



**Miguel Rocha dos Santos Serrasqueiro Rossa**

Licenciado em Ciências da Engenharia Física

**Projeto de equipamento industrial para extração  
de TCA de rolhas de cortiça natural**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Física**

Orientador: Prof. Dr. Orlando Teodoro,  
Professor Associado com Agregação,  
Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Dr. André Wemans  
Arguente: Dr. João Fradinho  
Vogal: Dr. Orlando Teodoro



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Outubro, 2020**



## **Projeto de equipamento industrial para extração de TCA de rolhas de cortiça natural**

Copyright © Miguel Rocha dos Santos Serrasqueiro Rossa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer ao meu orientador Prof. Orlando Teodoro pela oportunidade na realização de um projeto de engenharia pura onde são aprofundados variados temas todos eles interessantes. Foi uma experiência enriquecedora a vários níveis numa busca por respostas e adaptações à realidade do projeto. Agradeço-lhe também porque não só me deu a liberdade de pensar por mim mesmo na forma como abordar determinados temas, como também me ajudou imenso quando eu mais precisei.

Agradeço também à minha família e namorada por toda a paciência (que não foi pouca!) e suporte dado ao longo de todo o meu percurso académico e especialmente à motivação transmitida para terminar este projeto. Sem eles, a conclusão do mesmo teria sido muito mais difícil.



## RESUMO

---

Esta tese teve como principal objetivo projetar um equipamento industrial eficaz na remoção do composto 2,4,6 - tricloroanisol de rolhas de cortiça natural tendo por base pressupostos já estudados e realizados no laboratório METROVAC.

Este composto, abreviado de TCA, em ambiente não controlado impregna-se nas rolhas de cortiça e confere-lhes um aroma que contamina o produto final, nomeadamente o vinho onde a rolha é mais utilizada, inviabilizando o seu consumo.

Através de um processo de dessorção térmica em vácuo um equipamento é assim desenhado por forma a combater este fenómeno que já causou elevados danos financeiros às indústrias corticeiras e vitivinícolas, não só portuguesas como de todo o mundo.

Fazendo um estudo das características físico-mecânicas essenciais, um equipamento que respeite o desígnio do projeto é dimensionado em *SolidWorks* tendo em conta características físicas tais como pressão, temperatura e movimento de rotação.

Aproveito este espaço também para mencionar que não foi pretendido, de forma alguma, copiar o trabalho, resultados de investigação ou conclusões de outros autores e torná-los de minha autoria. Se o mesmo aconteceu, ou foi sem intenção ou por considerar que os resultados apresentados são transversais na comunidade científica e não de autoria própria.

**Palavras-chave:** vácuo, radiação, rotação, pressão.

---





## ABSTRACT

---

This thesis's main objective was to design an effective industrial equipment in the removal of the 2,4,6 - trichloroanisole compound from natural cork stoppers based on assumptions already studied and performed in laboratory.

This compound, abbreviated as TCA, in an uncontrolled environment is impregnated in the cork stoppers and gives them an aroma that contaminates the final product, namely in wine where the cork is most used.

Through a vacuum thermal desorption process, an equipment is thus designed to combat this phenomenon that has already caused high financial damage to the cork and wine industries, not only portuguese but worldwide as well.

Making a study of the basic physical-mechanical characteristics required, an equipment that follows main guidelines is dimensioned in *SolidWorks* taking into account characteristics such as pressure, temperature and movement.

I also use this space to mention that it was not intended, in any way, to copy the work, research results or conclusions made by other authors and make them my own. If it happened, it was either unintentional or by considering the results presented are transversal to the scientific community and not of particular authorship.

**Keywords:** vacuum, radiation, mechanical rotation, pressure.

---



# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 TCA . . . . .	3
1.2 Objetivo e estrutura da tese . . . . .	4
<b>2 Estado de Arte</b>	<b>7</b>
2.1 Métodos para extração/descontaminação do TCA . . . . .	7
2.1.1 Sistemas de cozedura . . . . .	7
2.1.2 Destilação sob vapor de água controlado . . . . .	8
2.1.3 Volatilização por arrastamento em fase gasosa de polaridade ajustada, sob temperaturas e humidade controladas . . . . .	9
2.1.4 Extração com CO <sub>2</sub> no estado supercrítico . . . . .	10
2.1.5 Extração por Soxhlet . . . . .	11
2.2 Medidas preventivas . . . . .	11
2.2.1 Radiação ionizante . . . . .	11
2.2.2 Micro-ondas . . . . .	11
2.2.3 Symbios . . . . .	12
2.2.4 Barreiras Físicas . . . . .	13
2.2.5 Enzimas . . . . .	13
2.2.6 Desodorização por aquecimento a seco . . . . .	13
2.2.7 Desodorização com ácido cítrico . . . . .	13
2.3 Controlo de Qualidade . . . . .	13
<b>3 Contextualização</b>	<b>15</b>
3.1 Pressupostos de dimensionamento . . . . .	15
3.2 O equipamento . . . . .	16
3.2.1 Rolhas de cortiça . . . . .	16
3.2.2 Câmara de vácuo . . . . .	18
3.2.3 Tambor rotativo . . . . .	21
3.2.4 Lâmpadas de aquecimento por infravermelho . . . . .	22

3.2.5	Manómetros de Pressão . . . . .	27
3.2.6	Filtro de poeiras e trapa fria . . . . .	28
3.2.7	Bomba de Vácuo . . . . .	29
3.2.8	Controlador . . . . .	34
3.2.9	Motor Elétrico . . . . .	34
3.2.10	Apoios da câmara . . . . .	39
3.2.11	Cabeça e porta de abertura rápida . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>41</b>
4.1	Câmara de vácuo . . . . .	41
4.2	Suportes câmara . . . . .	44
4.3	Sistema de vácuo . . . . .	45
4.3.1	Regime Turbulento . . . . .	48
4.3.2	Regime Viscoso . . . . .	48
4.3.3	Determinação do tempo total de bombeamento . . . . .	51
4.4	Sistema termodinâmico . . . . .	53
4.4.1	Cálculo da potência necessária das lâmpadas infravermelho. . . . .	54
4.4.2	Cálculo fator geométrico . . . . .	55
4.4.3	Cálculos de transferência de calor . . . . .	56
4.5	Sistema de rotação . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Simulação de pressão, temperatura e montagem final</b>	<b>65</b>
5.1	Impacto pressão externa . . . . .	65
5.2	Velocidade de aquecimento . . . . .	68
5.3	Montagem final . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>77</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>79</b>
<b>A</b>	<b>Desenhos Técnicos</b>	

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Estrutura da parede celular da cortiça vista ao microscópio [4]. . . . .	2
1.2	Formação do 2,4,6-tricloroanisol por biometilação [5]. . . . .	4
2.1	Sistema de cozedura <i>Convex</i> implementado pela A&I. Retirada de [10]. . . .	8
2.2	Esquema e fotografia do processo Innocork [16]. . . . .	10
2.3	Observação por microscopia ótica da atividade das espécies microbiológicas. Ambas retiradas de [19]. . . . .	12
2.4	Equipamento NDtech e linha de montagem [20]. . . . .	14
3.1	Influência da temperatura na dessorção do TCA. . . . .	15
3.2	Esquema geral do equipamento projetado. . . . .	16
3.3	Imagem genérica de uma rolha de cortiça natural [21]. . . . .	17
3.4	Esquema de câmara de vácuo e dimensões principais. . . . .	18
3.5	Gráficos para atribuição de espessura da câmara [23]. . . . .	19
3.6	Gráfico para determinação do fator <i>A</i> com base na espessura, diâmetro externo e comprimento da câmara [23]. . . . .	20
3.7	Gráfico para determinação do fator <i>B</i> [23]. . . . .	20
3.8	Gráfico de energia total emitida em função da temperatura. . . . .	23
3.9	Evolução do fator geométrico em função das dimensões e distância entre dois pratos paralelos. . . . .	24
3.10	Interação da radiação na superfície de um corpo. . . . .	24
3.11	Efeito da emissividade na energia emitida por um corpo. . . . .	25
3.12	A radiância consiste na soma da radiação refletida e emitida. . . . .	25
3.13	Transferência de calor entre duas superfícies tendo por base a analogia a um circuito elétrico [27]. . . . .	27
3.14	Exemplo de um manómetro piezo/pirani [29]. . . . .	28
3.15	Filtro de Poeiras Edwards [31]. . . . .	28
3.16	Trapa fria angular da marca Nor-Cal [32]. . . . .	29
3.17	Fluxo Turbulento. . . . .	31
3.18	Fluxo Laminar. . . . .	31
3.19	Fluxo Molecular. . . . .	32
3.20	Curva de desempenho de uma bomba <i>scroll</i> [33]. . . . .	33
3.21	Curva de desempenho de uma bomba rotativa [33]. . . . .	33

3.22	Componentes principais de um motor elétrico AC [35]. . . . .	35
3.23	Cilindro representativo do tambor com indicação dos raios interno (2) e externo (1). . . . .	36
3.24	Transmissão de movimento de um motor com acoplamento de rodas dentadas [36]. . . . .	37
3.25	Dimensões principais de engrenagens cilíndricas. Adaptado de [37]. . . . .	38
3.26	Imagem genérica do apoio de um câmara de pressão horizontal [38]. . . . .	39
3.27	Vistas da câmara de pressão com grandezas relevantes ao dimensionamento dos apoios. Desenhado com base em [23]. . . . .	39
3.28	Diferentes tipos de cabeças para câmaras de pressão [39]. . . . .	40
4.1	Vista isométrica da câmara com foco na cabeça torisférica. . . . .	43
4.2	Vista isométrica da câmara com foco na porta lateral. . . . .	43
4.3	Vista isométrica da câmara de pressão com apoios. . . . .	45
4.4	Variação do volume ocupado pelo vapor de água das rolhas de cortiça em função da pressão à temperatura ambiente (linha azul) com indicação do volume médio (linha laranja). . . . .	46
4.5	Sistema de vácuo incorporado na câmara. . . . .	47
4.6	Progressão do número de Reynolds e fluxo Q em função da pressão. . . . .	48
4.7	Vista de topo do sistema de vácuo com indicação das condutâncias a calcular. . . . .	49
4.8	Vista lateral do sistema de vácuo com indicação das condutâncias a calcular. . . . .	50
4.9	Bomba <i>Roots</i> marca Edwards modelo EH2600. . . . .	52
4.10	Bomba rotativa dois estágios marca Edwards modelo E2M275. . . . .	52
4.11	Velocidade da bomba <i>roots</i> em função da pressão [40]. . . . .	52
4.12	Vista isométrica do tambor rotativo com suporte e lâmpadas infravermelho - 1. . . . .	53
4.13	Vista isométrica do tambor rotativo com suporte e lâmpadas infravermelho - 2. . . . .	54
4.14	Planos paralelos considerados para cálculo do fator geométrico. . . . .	55
4.15	Esquemático elétrico representativo da transferência de calor entre três superfícies num espaço fechado [27]. . . . .	56
4.16	Evolução da temperatura das rolhas, tambor e câmara. . . . .	59
4.17	Evolução das perdas do sistema. . . . .	59
4.18	<i>Close-up</i> sistema rotação. . . . .	61
4.19	Moto-redutor marca Groschopp modelo 76269 [41]. . . . .	63
4.20	Curva velocidade-torque do modelo 76269 [42]. . . . .	64
5.1	Características aço Inox 304L colocadas no <i>SolidWorks</i> para simulação. . . . .	66
5.2	Malha e pontos de pressão aplicados na câmara. . . . .	66
5.3	Distribuição da tensão equivalente de von Mises na câmara de pressão. . . . .	67
5.4	Pontos de falha nas dobradiças do equipamento. . . . .	67
5.5	Correção das tensões aplicadas na dobradiça por inclusão de material e atenuação de arestas. . . . .	68

5.6	Montagem do conjunto descrito para avaliação térmica. . . . .	69
5.7	Evolução da temperatura do conjunto determinada por simulação. . . . .	69
5.8	Evolução da temperatura das rolhas - simulação <i>vs</i> teórico. . . . .	70
5.9	Evolução da temperatura do tambor - simulação <i>vs</i> teórico. . . . .	70
5.10	Evolução da temperatura da câmara - simulação <i>vs</i> teórico. . . . .	70
5.11	Modulação temporal da potência das lâmpadas IV. . . . .	71
5.12	Evolução temporal da temperatura das rolhas após retificação da potência das lâmpadas IV. . . . .	71
5.13	Montagem - 1. . . . .	73
5.14	Montagem - 2. . . . .	73
5.15	Montagem - 3. . . . .	74
5.16	Montagem - 4. . . . .	74
5.17	Montagem - 5. . . . .	75





## LISTA DE TABELAS

2.1	Concentrações de TCA (ng/L) antes e após tratamento por destilação sob vapor de água controlado em amostras contaminadas naturalmente [15]. . . . .	9
2.2	Concentrações de TCA (ng/L) antes e após tratamento por destilação sob vapor de água controlado em amostras experimentalmente contaminadas [15]. . . .	9
3.1	Características físico-mecânicas da cortiça [22]. . . . .	17
3.2	Materiais constituintes aço inox 304L . . . . .	21
3.3	Propriedades mecânicas aço Inox 304L . . . . .	21
3.4	Propriedades físicas aço Inox 304L . . . . .	21
4.1	Dimensões usadas para cálculo das tensões aplicadas aos apoios. . . . .	44
4.2	Tabela com dimensões do diâmetro e comprimento das flanges de ligação do sistema de vácuo. . . . .	50



## INTRODUÇÃO

A cortiça consiste num material de origem vegetal proveniente da casca dos sobreiros (*Quercus Suber* L.). A sua aplicação encontra-se registada num período temporal que data até 3000 anos antes de Cristo com chineses, egípcios, babilónios, assírios, fenícios e persas a utilizarem este material em bóias de pesca e sapatos, aplicações que ainda hoje se mantêm.

Nas escavações de Pompeia foram também encontradas ânforas de vinho vedadas com cortiça e Virgílio (70-19 a.C.) refere que soldados romanos cobriam a cabeça com cortiça como isolante térmico, sendo que daí e ao longo da Idade Média a cortiça foi utilizada como recipiente para líquidos, cestos para carne e pão, medidas de cereais e mobiliário. Mais de quarenta séculos se passaram entre a primeira referência à aplicação da cortiça e o culminar da indústria rolheira, com o francês D. Pierre Pérignon a dar origem ao método de champanização ao trocar tampões de madeira envoltos em cânhamos embebido em azeite por rolhas de cortiça revestidas com cera e presas ao gargalo com arame ou cordão. O sucesso desta alternativa na preservação e maturação do vinho tornou a cortiça indispensável ao engarrafamento dos vinhos e casas tais como Ruinart de Reims (1729) e Moët et Chandon (1743) foram fundadas para a sua elaboração.

Na península ibérica e particularmente em Portugal a indústria rolheira iniciou-se na época de Marquês de Pombal tornando-se relevante após a 1ª Guerra Mundial e sobretudo a partir de 1930, com a primeira casa a ser fundada em Santiago do Escoural e expandindo-se para Lisboa e Portalegre, sendo que atualmente existem cerca de 860 empresas a trabalhar no setor.

A produção de cortiça atinge cerca de 340 mil toneladas por ano e Portugal, devido às suas condições climáticas favoráveis, é responsável pela produção de cerca de 55% deste valor [1] [2].

Estruturalmente a cortiça apresenta uma forma hexagonal e um ácido gordo complexo,

sendo preenchida por um gás semelhante ao ar que ocupa entre 70 a 80% do seu volume e que a torna um bom material isolador térmico. De um ponto de vista químico esta é constituída de:

- Suberina (45%): biopolímero de carácter lipídico constituído por ácidos gordos, álcoois gordos e glicerol - principal componente da parede celular e responsável pela sua elasticidade;
- Lenhina (27%): polímero de carácter aromático constituído por monómeros do tipo fenilpropano - confere impermeabilidade e resistência a ataques microbiológicos e mecânicos aos tecidos vegetais da cortiça;
- Polissacáridos (12%): celulose e hemiceluloses, polímeros onde as unidades monoméricas são monossacáridos, pentoses e hexoses - componentes que definem a textura da cortiça;
- Taninos (6%): compostos polifenólicos responsáveis pela cor;
- Ceróides (5%) - compostos hidrofóbicos que asseguram a impermeabilidade da cortiça;

Por ser um material bastante leve, impermeável a líquidos e gases, elástico, compressível, isolante térmico e acústico bem como resistente ao atrito, a cortiça apresenta uma série de propriedades intrínsecas que a tornam um material ímpar em variadas aplicações estruturais [3].

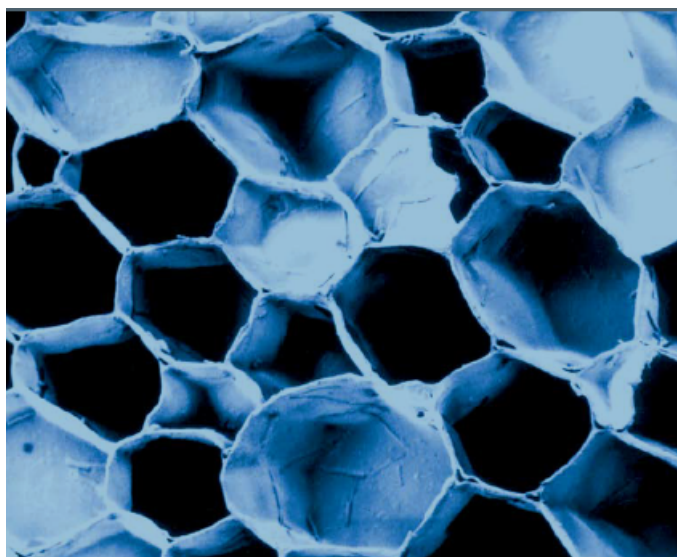


Figura 1.1: Estrutura da parede celular da cortiça vista ao microscópio [4].

## 1.1 TCA

O composto químico 2,4,6-tricloroanisol, conhecido como TCA, consiste num haloanisol e sempre foi um dos grandes adversários das indústrias corticeira e vitivinícola. Apesar deste composto ser inofensivo para a saúde humana, a sua presença nas rolhas de cortiça utilizadas para vedar garrafas de vinho, mesmo que em quantidades vestigiais, provoca uma contaminação conhecida como "gosto a rolha", que suprime os sabores frutados e naturais do vinho.

Desde o início dos anos 90 que vários outros compostos foram identificados como sendo possíveis responsáveis desta contaminação, tais como o 2,3,4,6-tetraclorofenol, o 2,4,6-tribromoanisol e o pentacloroanisol [1, 5].

Para além destes compostos, fungos tais como o *Penicillium*, *Aspergillus niger*, *Penicillium niger* e leveduras, foram também identificados como responsáveis por desvios organolépticos no vinho. No entanto, e de acordo com estudos realizados em lotes de rolhas contaminadas, o TCA foi identificado como o principal responsável por estes desvios, estando presente em cerca de 80 % dos vinhos analisados e o que tem o limite de deteção mais baixo (aproximadamente 5 ng/L) [6][7].

A formação dos haloanisóis ocorre por uma transformação química (biometilação) dos halofenóis, sendo os mais representativos os clorofenóis e os bromofenóis. Os clorofenóis são substâncias tóxicas para os animais e humanos e foram muito utilizados, durante décadas, como pesticidas e fungicidas, sendo atualmente a sua utilização proibida pela União Europeia. Já os bromofenóis têm origem natural e podem ser sintetizados por algas castanhas e encontram-se geralmente em águas residuais provenientes de tratamentos com cloro e na presença de iões brometo.

A biometilação consiste numa reação catalizada por uma enzima, O-metiltransferase, que converte os halofenóis em haloanisóis, compostos inofensivos ao metabolismo dos microrganismos. [5]

Na Figura 1.2 podemos observar esquematicamente o processo que leva à formação do TCA na cortiça.

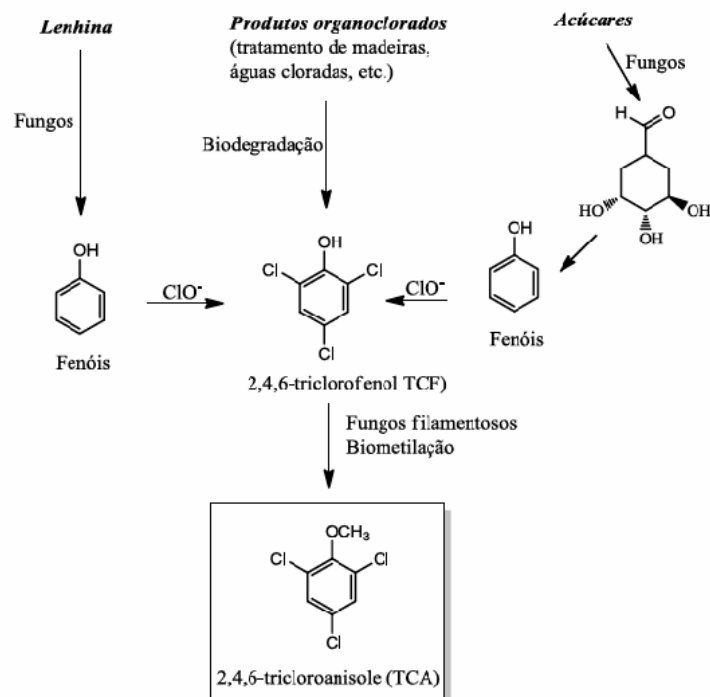


Figura 1.2: Formação do 2,4,6-tricloroanisol por biometilação [5].

Com um limite de detecção tão baixo e uma percentagem de cerca de 1 % de rolhas vendidas atualmente com contaminação detectável, o combate ao TCA tem sido um dos principais desafios das indústrias corticeiras, com principal destaque para a Amorim & Irmãos, a qual vende cerca de 4 mil milhões de rolhas por ano.

## 1.2 Objetivo e estrutura da tese

Esta tese tem como objetivo dimensionar e projetar um equipamento industrial eficaz na extração do TCA por um processo de dessorção térmica em vácuo que se mostrou eficaz quando realizado no laboratório METROVAC.

Desta forma, no capítulo 2 serão apresentados os mecanismos desenvolvidos pelas empresas corticeiras de forma a combater o referido composto, descrevendo mecanismos que assentam principalmente em estratégias de extração e descontaminação, prevenção e de controlo de qualidade.

No capítulo 3 vão ser referidas as características estruturais do equipamento a dimensionar bem como as suas especificações e formulações teóricas consideradas para uma eficiente dessorção térmica.

Por sua vez, no capítulo 4 são apresentados os resultados das formulações teóricas usadas para definição do equipamento, bem como o seu projeto e dimensionamento. Aqui

começou-se pela definição da estrutura de suporte sujeita a pressão externa, nomeadamente a câmara, porta e apoios tendo-se depois passado para o sistema de vácuo, térmico e de rotação, respetivamente.

Como suporte e validação dos cálculos teóricos realizados, no capítulo 5 demonstra-se um teste de pressão por forma a complementar a construção da câmara bem como um teste termodinâmico que permite avaliar a cinética de aquecimento de todas as superfícies consideradas.

Por fim, no capítulo 6 é feita uma breve conclusão dos resultados obtidos e no anexo A demonstram-se os desenhos técnicos dos componentes não normalizados do projeto.





## ESTADO DE ARTE

De seguida enumeram-se os principais mecanismos e estratégias de combate ao TCA desenvolvidos pela indústria corticeira.

Estas estratégias assentam principalmente em medidas de extração/descontaminação, preventivas e de controlo de qualidade. Enquanto que as medidas de extração actuam directamente nos níveis de TCA presentes na cortiça, as medidas preventivas focam-se na eliminação das causas - eliminação dos microorganismos percursores e agentes clorados [8].

### 2.1 Métodos para extração/descontaminação do TCA

Os métodos para extração do TCA assentam em sistemas de cozedura avançados, destilação sob vapor controlado, volatilização por arrastamento em temperatura e humidade controladas, volatilização por arrastamento em fase gasosa de polaridade ajustada, sob temperaturas e humidade controladas e extração com CO<sub>2</sub> no estado supercrítico [9].

#### 2.1.1 Sistemas de cozedura

Os processos de extração por cozedura consistem em sistemas dinâmicos onde água está constantemente a circular e ao mesmo tempo a ser descontaminada antes de entrar novamente no ciclo de cozedura, permitindo a cozedura uniforme de todas as pranchas a altas temperaturas. Estes sistemas permitem uma extração eficaz de compostos solúveis e compostos orgânicos voláteis como o TCA evitando a possibilidade de contaminação cruzada.

Dentro destes sistemas, o sistema de cozedura dinâmico *Convex* desenvolvido pela A&I (Amorim & Irmãos) coze as pranchas de cortiça em tanques de aço inoxidável fechados e

filtrados, com o intuito de remover sólidos orgânicos alojados nos poros e permitir que a cortiça atinja o teor de humidade correto para ser processada. Cada lote de duas toneladas é cozido nestes tanques de tratamento, processo este que provoca a expansão do ar no interior das células da cortiça, melhorando a sua estrutura interna e contribuindo para a redução da microflora. No final deste processo, as pranchas aumentam 20 % de volume, ficam mais espessas, regulares e mais fáceis de manusear. Após dois dias de repouso, as pranchas estão prontas a serem processadas [5, 10].

Para além deste sistema de cozedura, a A&I desenvolveu em 1998 um processo de lavação hidrodinâmica de discos para rolhas técnicas chamado de INOS II. Neste sistema a cortiça é colocada num recipiente fechado e imersa em água quente purificada. De seguida uma pressão de 10 bar é aplicada à superfície do líquido durante uma hora, através de um gás ou mistura de gases. Passado este tempo o gás é libertado e é aplicado vácuo primário. Este processo de compressão/descompressão cíclico permite lavar em profundidade as lenticelas e poros da cortiça [11, 12].



Figura 2.1: Sistema de cozedura *Convex* implementado pela A&I. Retirada de [10].

### 2.1.2 Destilação sob vapor de água controlado

A destilação sob vapor controlado consiste numa técnica onde vapor e água sob pressão removem compostos voláteis das células da cortiça. Esta técnica, desenvolvida em 2004 pela A&I com o nome ROSA (*Rate of Optimal Steam Application*), tem a capacidade de remover cerca de 90 % do TCA e outros compostos presentes na cortiça [13].

Como esta técnica afeta as propriedades físico-mecânicas das rolhas de cortiça natural, tais como a elasticidade, resiliência e capacidade de vedação, é apenas aplicada a grânulos de cortiça [14].

No entanto, este problema foi ultrapassado pelo ROSA Evolution que por um processo de optimização de tempo, temperatura e humidade permitiu a mesma eficácia e tratamento

## 2.1. MÉTODOS PARA EXTRAÇÃO/DESCONTAMINAÇÃO DO TCA

em discos e rolhas de cortiça natural, com taxas de remoção médias de 82 % para discos e 77 % para rolhas naturais [11].

Estes sistemas comportam um cilindro de grandes dimensões onde se aplicam temperaturas entre os 100 °C e 125 °C e pressões entre os 200 mbar e 800 mbar. O tempo de contacto pode variar de 6 minutos a 65 minutos. A eficiência dos sistemas ROSA e ROSA Evolution foi validada em vários estágios, sendo primeiro estudado a uma escala laboratorial seguida de testes à escala industrial. Foram utilizados granulados, discos e rolhas naturais experimentalmente e naturalmente contaminados com TCA por forma a verificar a magnitude de redução alcançável pelos sistemas. Nas tabelas seguintes podemos observar os resultados alcançáveis por estes sistemas.

Tabela 2.1: Concentrações de TCA (ng/L) antes e após tratamento por destilação sob vapor de água controlado em amostras contaminadas naturalmente [15].

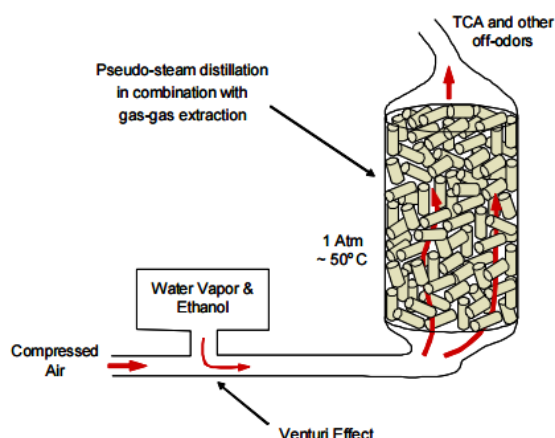
	Dimensões (mm)	10 min.		20 min.		30 min.		60 min.	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Granulados	0,5-1 2-3	24,6	7,3	24,6	7,1	24,6	4		
				14,2	4				
				10,6	4				
Discos						32,75	1,9	32,75	1,9

Tabela 2.2: Concentrações de TCA (ng/L) antes e após tratamento por destilação sob vapor de água controlado em amostras experimentalmente contaminadas [15].

	Dimensões (mm)	10 min.		20 min.		30 min.		60 min.	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Granulados	3-4 4-6	181	37,5			181	32,5	181	28
				268,3	50,2				
				323,8	47,8				
				330,7	55,1				
				267,3	50,1				
Discos		41,4	11,1	65,9	3,6	41,4	7	41,4	5
				47,4	2,8				
				41,3	1,8				
Cortiça Natural				47,4	9,6				

### 2.1.3 Volatilização por arrastamento em fase gasosa de polaridade ajustada, sob temperaturas e humidade controladas

Esta técnica, realizada pela *Cork Supply*, recorre à tecnologia patenteada *Innocork* que através da combinação de vapor de água, álcool etílico e temperatura controlada permite volatilizar o TCA presente na estrutura celular da cortiça. É um processo aplicável a rolhas naturais e que permite reduzir o TCA para valores tão baixos quanto 1,0 ng/L sem provocar alterações físico-mecânicas.



Esquema do processo Innocork.

Fotografia do equipamento Innocork.

Figura 2.2: Esquema e fotografia do processo Innocork [16].

Este processo tem como princípio reduzir as forças de ligação entre o TCA e a suberina (ou outros constituintes), sendo que foram indentificadas forças de adsorção do tipo de Van der Waals e pontes de hidrogénio.

O processo Innocork é realizado em três etapas [16]:

- Impregnação – a introdução de vapor de água com etanol gera uma atmosfera de polaridade ajustada à dessorção das moléculas de TCA na câmara de extração;
- Arraste – o teor em etanol é progressivamente diminuído chegando a anular-se – nesse momento as condições existentes aproximam-se às de um processo de arrastamento de vapor tal como amplamente usado na extração de aromas a partir de produtos naturais;
- Secagem – uma etapa final tem por objectivo evaporar as moléculas que foram arrastadas até à superfície das rolhas, contribuindo para uma redução efectiva do teor de TCA migrável;

#### 2.1.4 Extração com CO<sub>2</sub> no estado supercrítico

O método de extração com CO<sub>2</sub> no estado supercrítico foi desenvolvido pelo grupo francês OENEO e o processo, de nome Diamant, consiste num método onde dióxido de carbono é comprimido até ao seu estado supercrítico, ou seja, onde a fase líquida e gasosa coexistem. Este método apresenta uma eficiência de remoção de TCA de cerca 99,8 %, no entanto também altera as propriedades físico-mecânicas das rolhas naturais, sendo apenas aplicável a granulados [11].

De forma a se otimizar a eficiência de extração e seletividade, as pressões e temperatura do solvente (CO<sub>2</sub>) são variadas, sendo que este é conduzido através de uma bomba até às células de extração, as quais estão contidas num forno a temperatura controlada. À

medida que o CO<sub>2</sub> flui ao longo da amostra o analito é dissolvido, sendo que ambos saem do forno e entram num restritor, onde ocorre uma alteração da pressão de trabalho até à pressão atmosférica. Esta alteração de pressão força o analito a sair da solução, o qual é coletado numa trapa fria a 0 °C. A amostra coletada é analisada por cromatografia em fase gasosa [7].

### **2.1.5 Extração por Soxhlet**

Neste método o TCA é removido por um Soxhlet a 45 °C durante 24 horas com o uso de n-pentano. Através deste método todo o TCA é removido da cortiça, tanto da superfície como do interior, no entanto este equipamento é extremamente caro e os custos de produção tornam-se muito altos. Para além dos custos, este método acarreta um certo grau de risco no manuseamento de alcanos bem como contaminação da cortiça com o solvente, sendo aplicado apenas a nível laboratorial [17].

## **2.2 Medidas preventivas**

Dentro das medidas preventivas as mais usuais são a radiação ionizante, micro-ondas, Symbios e ações enzimáticas.

### **2.2.1 Radiação ionizante**

A radiação ionizante é um processo esterilizante aplicável a diferentes materiais, sendo passível de ser aplicado em produtos de cortiça por redução da sua carga microbiana. Devido ao facto de que alguns microorganismos existentes podem dar origem a metabólitos que podem ser a origem de compostos clorados, tais como o TCA, a sua redução ou eliminação pode contribuir para um decréscimo do "gosto a rolha". Em particular, C. Pereira et al (2006) [18] aplicaram radiação gama a rolhas de cortiça naturais sem qualquer tratamento superficial retiradas de lotes com vestígios de contaminação (mancha amarela). As amostras foram irradiadas por uma fonte de <sup>60</sup>Co com doses entre 15,4 kGy e 400 kGy. Dos seus resultados foi possível concluir que a radiação gama promoveu uma redução forte do TCA nas rolhas, com taxas de eliminação acima de 90 % com uma dose de 100 kGy.

### **2.2.2 Micro-ondas**

Uma empresa do setor através de um processo designado por DELFIN (Direct Environment Load Focused INactivation) utiliza micro-ondas que, ao contrário dos sistemas tradicionais que aquecem a superfície da rolha, utiliza ondas eletromagnéticas para penetrar na cortiça e aquecê-la através da água existente tanto na cortiça como nos microorganismos que a habitam, facto que resulta na morte destes últimos e na evaporação das

contaminações químicas e odores estranhos. O sistema compreende um cilindro de grandes dimensões com tapetes de movimentação e sistemas de extração dos voláteis, tendo vários magnetrons de 800 W com um tempo de residência de 20 minutos e onde se atinge uma temperatura de 38 °C [8].

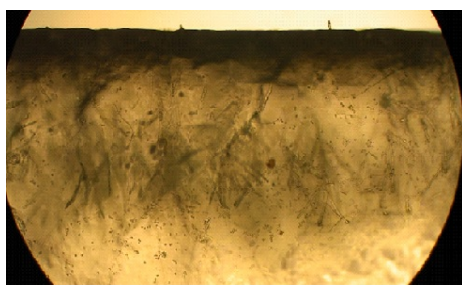
Este sistema tem efeitos significativos na redução de microorganismos mas não permite remover o TCA presente na cortiça.

### 2.2.3 Symbios

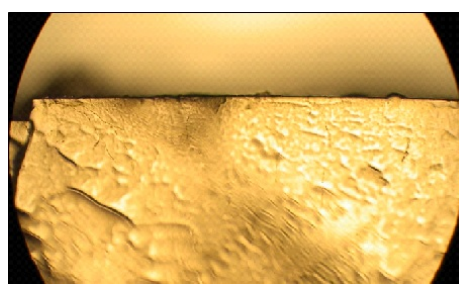
*Symbios* consiste num processo de cariz preventivo desenvolvido pela CTCOR (Centro Tecnológico da Cortiça) que promove o desenvolvimento de microorganismos "benignos" que ocorrem naturalmente na cortiça em detrimento de espécies com potencial de formação de metabolitos indesejados, tais como os cloroanisóis.

Este processo atua directamente na etapa de cozedura da cortiça por enriquecimento da água com determinados aditivos químicos (os aditivos em concreto não são divulgados) que por difusão em meio aquoso fervente, fixam-se nas estruturas ricas em compostos lenhino-polissacáridos, nomeadamente nas paredes interiores dos canais lenticulares e raspa da cortiça.

As pranchas tratadas por este processo apresentam um forte controlo da atividade microbiológica, inibindo-se a formação de cloroanisóis. Para além de ser um processo que não altera as propriedades físico-mecânicas da cortiça, o Symbios cria uma espécie de "barreira" que impossibilita a penetração dos microorganismos na cortiça [19].



Perfil tangencial dos meios de cultura sem aditivação.



Perfil tangencial dos meios de cultura com aditivação.

Figura 2.3: Observação por microscopia ótica da atividade das espécies microbiológicas. Ambas retiradas de [19].



#### 2.2.4 Barreiras Físicas

O método *Cortex* consiste na utilização de uma barreira física entre a rolha de cortiça e o vinho e é um processo correntemente utilizado para prevenir a migração do TCA da rolha para o dito vinho.

Este produto consiste, muito simplesmente, numa barreira de silicone com cerca de 1 mm de espessura, adaptado à base da rolha que entra em contacto com o vinho. Esta barreira atrasa a migração do TCA por efeito físico, sendo que este processo não é útil para vinhos que ficam fechados por períodos de tempo longos onde o TCA migra pelo disco de silicone e contamina o vinho [13].

#### 2.2.5 Enzimas

Um outro processo proposto como sendo efetivo na redução do TCA consiste no uso de enzimas, nomeadamente a lacase-polifenol-oxidase. Esta enzima pode polimerizar fenóis podendo prevenir a sua conversão metabólica em anisóis por ação fúngica. Tal como os outros métodos preventivos, a utilização destas enzimas não atua em TCA que já se encontre presente na cortiça, não podendo ser aplicado como método extrativo [13].

#### 2.2.6 Desodorização por aquecimento a seco

Neste método a cortiça é aquecida e secada a 80 °C entre 6 horas a 8 horas, sendo que após este tempo algumas das substâncias responsáveis por odores estranhos são substancialmente evaporadas. No entanto, visto que o TCA em particular se encontra especificamente adsorvido nos compostos macromoleculares constituintes da cortiça, tais como a celulose, lenhina e suberina, é impossível removê-lo por um simples aquecimento a seco [17].

#### 2.2.7 Desodorização com ácido cítrico

Neste tratamento a cortiça é colocada numa solução de ácido cítrico (3 % vol) entre 3 minutos a 5 minutos. O efeito desta técnica de desodorização tem um curto período de duração, pois a cortiça resiste à absorção de líquidos e a solução não consegue alcançar o seu interior. Desta forma, tal como muitos dos métodos preventivos, este tratamento não remove o TCA do interior da cortiça e com o passar do tempo este acaba por se movimentar para a superfície e contaminar o vinho [17].

### 2.3 Controlo de Qualidade

O controlo de qualidade da cortiça é feito usualmente com uma combinação da técnica de microextração em fase sólida (SPME) com cromatografia em fase gasosa (GC), sendo adoptado preferencialmente a deteção por espectrometria de massa (MS). Outros sistemas de deteção como a captura de eletrões (ECD) podem também ser utilizados.

As amostras são colocadas no GC-MS sendo analisadas e quantificadas em modo SIM

(*Single Ion Monitoring*) com um nível de sensibilidade de 0,5 ng/L. A calibração das amostras é feita através do uso de um padrão deuterado ( $d_5$ TCA).

A *NDtech*, tecnologia desenvolvida e patenteada pela Amorim, permite realizar uma triagem e controlo de qualidade nas linhas de produção das rolhas de cortiça através da otimização do processo de cromatografia em fase gasosa - tipicamente este processo demora cerca de 14 minutos, com a *NDtech* é possível fazer uma análise do TCA em aproximadamente 16 segundos. Não só o tempo é drasticamente reduzido como é também possível avaliar se uma rolha apresenta contaminação superior a 0,5 ng/L, o que implica que seja automaticamente removida da cadeia de fornecimento. Com esta tecnologia, a Amorim afirma que o risco de uma rolha contaminada chegar aos produtores e consumidores finais é totalmente eliminado [20].



Figura 2.4: Equipamento NDtech e linha de montagem [20].



## CONTEXTUALIZAÇÃO

## 3.1 Pressupostos de dimensionamento

Tal como referido no capítulo 1, este trabalho pretende projetar um equipamento industrial tendo por base desenvolvimentos realizados pelo grupo METROVAC que permitiram de forma eficaz remover o composto TCA de rolhas de cortiça. Testes realizados mostram que por aplicação de uma temperatura de 180 °C associada a vácuo primário é possível quebrar a energia de ligação que se forma quando o TCA é adsorvido nas rolhas. O vácuo aplicado permite, por sua vez, remover o TCA da câmara e impedir que ocorram fenómenos de re-adsorção. Na figura 3.1 podemos observar a influência da temperatura no processo de dessorção do composto mencionado.

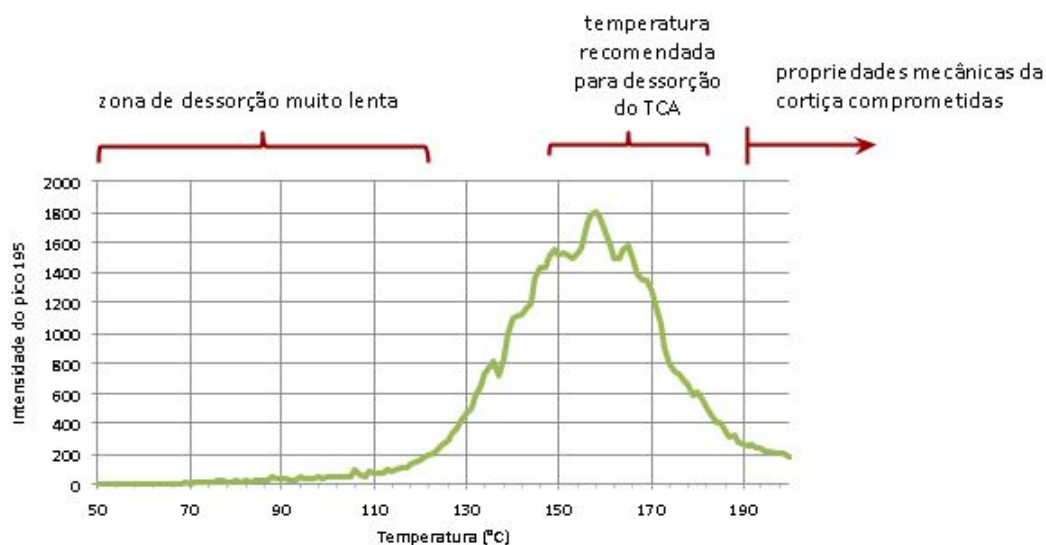


Figura 3.1: Influência da temperatura na dessorção do TCA.

O equipamento dimensionado tem por base os pressupostos mencionados e será capaz de suportar 20000 rolhas de cortiça, as quais são colocadas dentro de uma câmara cilíndrica de disposição horizontal. De seguida serão detalhados os componentes constituintes do equipamento e as formulações teóricas que sustentam a escolha dos mesmos.

## 3.2 O equipamento

Na figura 3.2 encontra-se uma representação esquemática do equipamento e todos os seus constituintes.

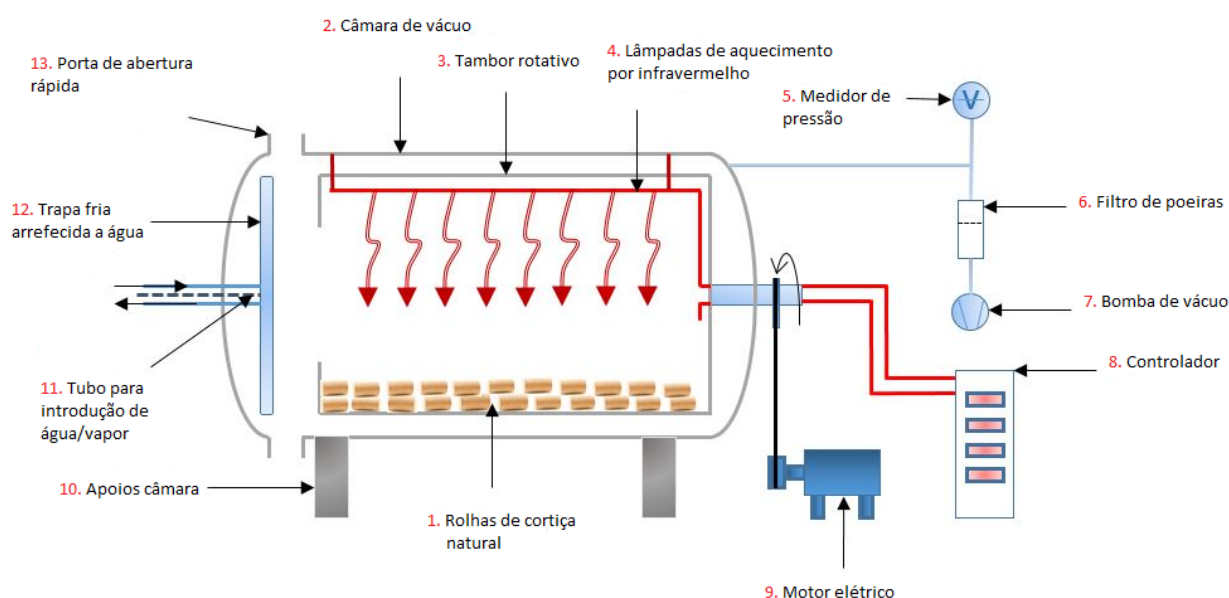


Figura 3.2: Esquema geral do equipamento projetado. <sup>1</sup>

### 3.2.1 Rolhas de cortiça

A cortiça é atualmente utilizada para formar variados tipos de rolhas bem como outros produtos técnicos, tais como isoladores térmicos e sonoros, produtos de imobiliário, brinquedos, acessórios de moda, entre outros.

Na indústria vitivinícola o propósito da cortiça prende-se principalmente na criação de rolhas que, tendo em vista o produto final e o seu método de formação podem ser rolhas de cortiça natural, multipeça, colmatadas, de champanhe, técnicas, micro granuladas ou aglomeradas. Neste projeto são as rolhas de cortiça natural que são introduzidas na câmara, pelo que de seguida serão indicadas as suas propriedades físicas principais.

<sup>1</sup>O desenho é representativo do que se pretende alcançar neste projeto e não o resultado final, sendo que determinados equipamentos e ligações poderão ser diferentes das que se mostram na imagem.

### 3.2.1.1 Rolhas de Cortiça Natural

As rolhas de cortiça natural são formadas por um processo de brocagem a partir de uma peça única de cortiça podendo adquirir uma forma cilíndrica ou cônica. São também as rolhas de cortiça natural as indicadas para uma maturação indicada do vinho e que permite a sua conservação sem que exista interferência no seu aroma, sendo portanto as rolhas de eleição para vinhos de estágio e vinhos de consumo rápido.



Figura 3.3: Imagem genérica de uma rolha de cortiça natural [21].

De um ponto de vista físico-mecânico, a rolha de cortiça natural apresenta as seguintes características:

Tabela 3.1: Características físico-mecânicas da cortiça [22].

Propriedades Físicas	Valor
Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )	160-240
Condutividade Térmica ( $\text{W/m.K}$ )	0,045
Calor Específico ( $\text{kJ/kg.K}$ )	1,7-1,8
Humidade (%)	2-8
Comprimento (mm)	38-50
Diâmetro (mm)	24-26

Considerando que uma rolha apresenta um volume aproximado de  $20 \text{ cm}^3$  (assumindo um comprimento de 44 mm e raio 12 mm) e densidade de cerca de  $0,175 \text{ g/cm}^3$ , uma rolha tem uma massa de cerca de 3,5 g, o que significa que o tambor será carregado com cerca de 70 kg em rolhas de cortiça. Porque 8 % desta massa corresponde a água, a mesma terá que ser removida por forma a atingir-se a pressão interna de 0,1 mbar, sendo que este tema será abordado com mais detalhe no capítulo 4.

### 3.2.2 Câmara de vácuo

A câmara consiste no equipamento principal que sustém as condições de pressão e temperatura internas do sistema sendo que neste projeto é dimensionada para manter uma pressão interna de 0,1 mbar.

Câmaras pressurizadas estão sempre sujeitas a variados tipos de forças que podem afetar o seu funcionamento ou danificar a sua estrutura, tais como pressão interna e/ou externa, o próprio peso da câmara e de equipamentos que se encontrem ligados a esta, fenómenos de expansão térmica, carregamentos cíclicos e condições ambientais.

Com base no desígnio do projeto, é razoável considerar que o maior impacto na câmara deve-se ao delta de pressão a que está sujeita, e assim, tendo por base o código ASME Sec.VIII Div.1 (American Society of Mechanical Engineers), os passos necessários para garantir uma espessura razoável da câmara são de seguida mencionados.

Na figura em baixo podemos observar o esquemático de uma câmara de pressão e as grandezas a ter em conta para o seu dimensionamento.

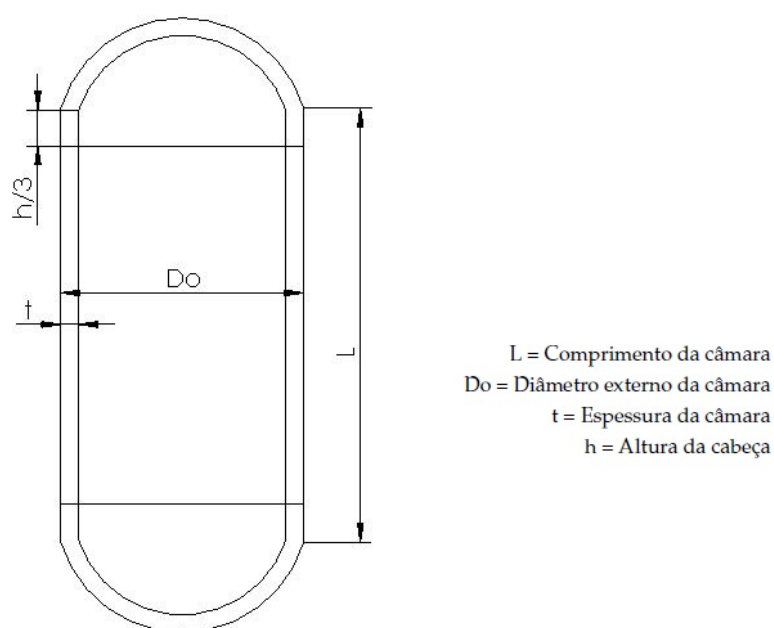


Figura 3.4: Esquemático câmara de vácuo e dimensões principais.<sup>2</sup>

A pressão máxima de trabalho admissível ( $P_a$ ) é o maior valor de pressão compatível com o código do projeto e tem por base a resistência dos materiais utilizados, as dimensões do equipamento e seus parâmetros operacionais. De acordo com este código a pressão máxima de trabalho admissível é dada por

<sup>2</sup>As grandezas utilizadas na figura não estão de acordo com o Sistema Internacional de Unidades mas foram assim mantidas para mais fácil identificação na norma de referência.

$$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} \quad (3.1)$$

com  $D_o$  e  $t$  as grandezas indicadas na figura 3.4 e  $B$  um fator a ser determinado. A determinação da pressão de trabalho admissível consiste num processo iterativo com recurso aos gráficos 3.5, 3.6 e 3.7, onde com base na espessura da câmara, a razão  $L/D_o$  e  $D_o/t$  se permite aferir se a pressão de trabalho é inferior ou superior à pressão de projeto - se a pressão de trabalho for inferior à pressão de projeto um novo valor de espessura ou comprimento da câmara deverá ser admitido e reavaliado. Inicialmente começa-se por atribuir um valor de espessura à câmara com base na figura 3.5.

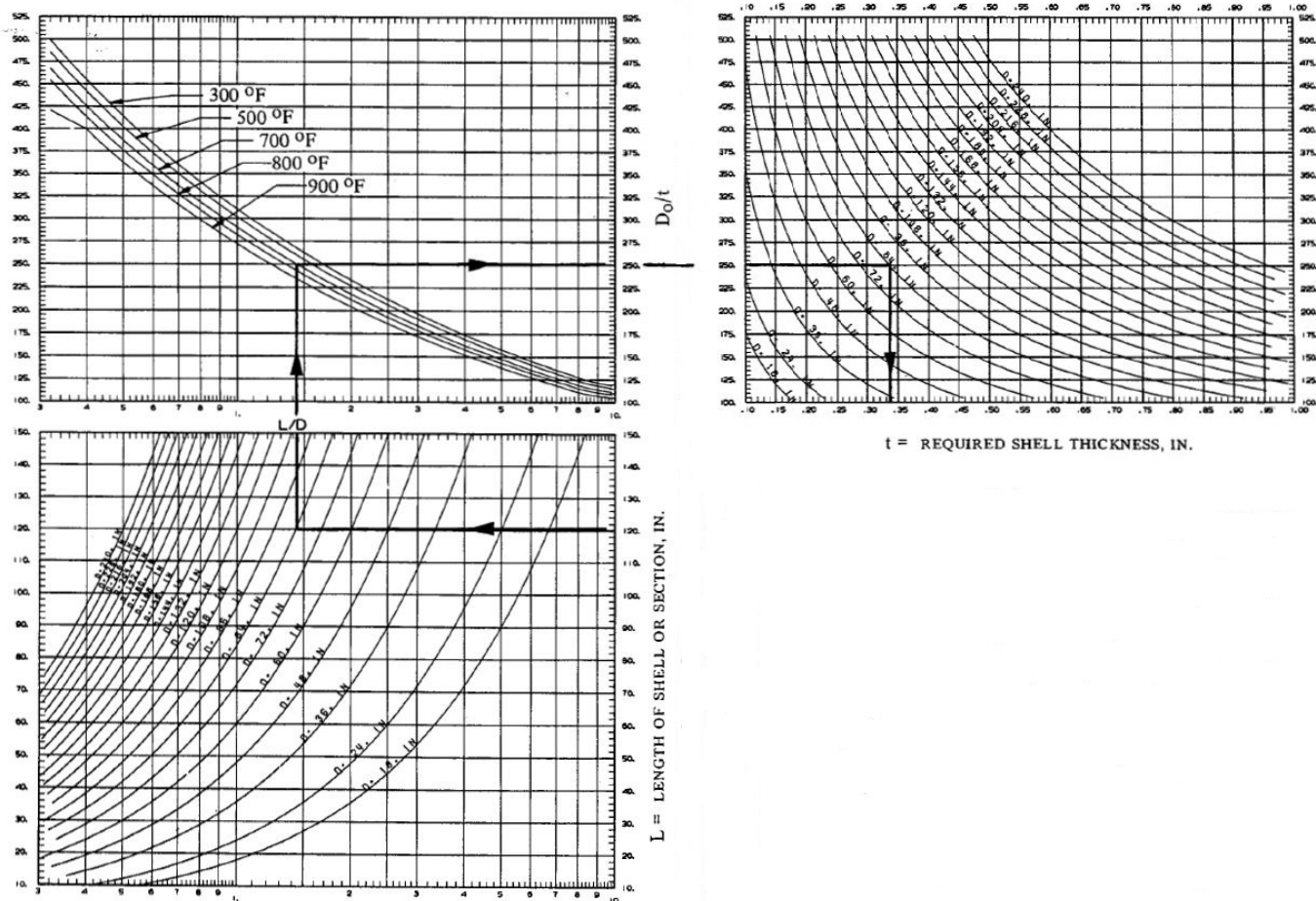


Figura 3.5: Gráficos para atribuição de espessura da câmara [23].

Após se atribuir um valor de espessura da câmara o fator  $A$  é determinado com base na figura 3.6 pela interseção do valor  $L/D_o$  com  $D_o/t$ . Após determinação do fator  $A$ , o mesmo serve de entrada na figura 3.7 para determinação do fator  $B$ .

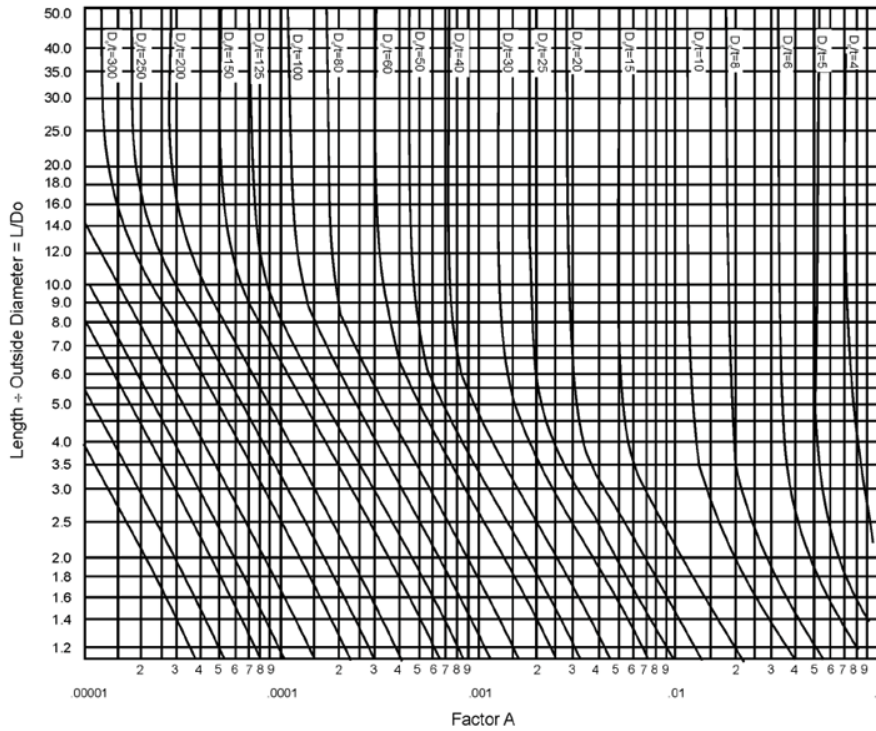


Figura 3.6: Gráfico para determinação do fator A com base na espessura, diâmetro externo e comprimento da câmara [23].

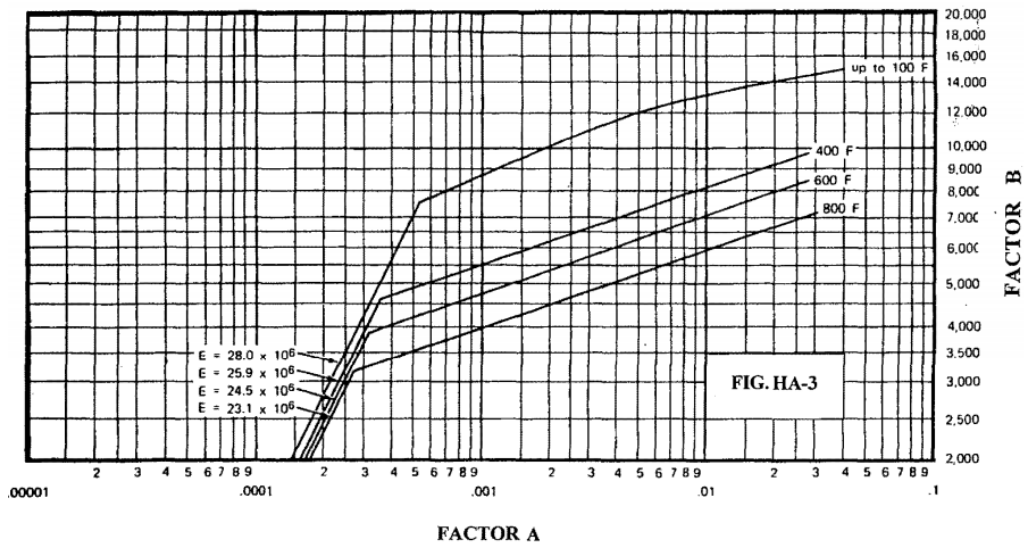


Figura 3.7: Gráfico para determinação do fator B [23].

Caso o valor do fator A determinado caia sob o lado esquerdo da linha de temperatura aplicável a pressão de trabalho admissível pode ser calculada por:

$$P_a = \frac{2AE}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} \quad (3.2)$$



sendo  $E$  o módulo de elasticidade do material à máxima temperatura de trabalho. A câmara terá uma disposição horizontal cilíndrica e o seu volume será definido tendo por base o volume do tambor, no qual serão colocadas as rolhas de cortiça. A câmara bem como todos os equipamentos estruturais expostos ao vácuo serão de aço inox 304L devido às suas propriedades intrínsecas que o tornam adequado em vácuo. Nas tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 podemos observar a composição, propriedades mecânicas e físicas do aço inox 304L, respetivamente. A simulação realizada em *SolidWorks* que permite aferir a estabilidade da câmara terá por base algumas das propriedades aqui mencionadas [24].

Tabela 3.2: Materiais constituintes aço inox 304L

Composição % (valores máximos)							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N
0,030	2,0	0,75	0,045	0,030	19,5	12,0	0,10

Tabela 3.3: Propriedades mecânicas aço Inox 304L

Propriedades mecânicas					
Resistência à tração (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão de trabalho admissível (MPa) <sup>3</sup>	Alongamento (% em 50 mm)	Dureza Rockwell B (HR B)	Dureza Brinell (HB)
485	170	115	40	92	201

Tabela 3.4: Propriedades físicas aço Inox 304L

Propriedades físicas				
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de expansão térmica médio 0 °C a 315 °C (µm/m/°C)	Condutividade térmica a 100 °C (W/m.K)	Calor específico 0 °C a 100 °C (J/kg.K)
7900	193	17,8	16,3	500

### 3.2.3 Tambor rotativo

O tambor rotativo consiste no equipamento que serve de suporte às rolhas de cortiça e que, em conjunto com o motor elétrico, uniformiza a sua temperatura. Este será dimensionado de forma a que o seu volume seja sensivelmente o dobro do volume ocupado pelas 20000 rolhas por forma a maximizar a área de exposição ao vácuo e radiação infravermelho. O tambor terá uma porta constituída de uma rede de aço inox com malha fechada, a qual será a única abertura do tambor a fim de evitar que ceras extraídas das rolhas contaminem a câmara.

<sup>3</sup>A tensão de trabalho admissível  $F_{\alpha}$  consiste na maior força (tensão, compressão ou flexão) permitida a aplicar num determinado material e é uma grandeza definida por normas/códigos de construção (25) (26).

O tambor irá rodar a uma velocidade próxima de 10 rpm e encontrar-se-à apoiado em rodas que facilitem a sua remoção da câmara.

### 3.2.4 Lâmpadas de aquecimento por infravermelho

O aquecimento das rolhas de cortiça tem início após se atingir a pressão interna de 0,1 mbar dentro da câmara. Num ambiente desprovido de gás a única forma de aquecer um objeto de forma eficiente é por radiação. Desta forma, serão colocadas lâmpadas de infravermelhos (IR) na parte superior do tambor rotativo de forma a transmitir calor de um modo uniforme a todas as rolhas.

Para se determinar a potência das lâmpadas necessária para aquecer as rolhas de cortiça a uma temperatura de 180 °C os três parâmetros físicos fundamentais a ter em consideração são:

- Lei de Stefan-Boltzmann;
- Fator geométrico;
- Emissividade;

#### 3.2.4.1 Lei de Stefan-Boltzmann

A lei de Stefan-Boltzmann estabelece que a energia térmica radiada por um corpo negro por segundo por unidade de área é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta e é dada por:

$$\frac{P}{A} = \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3.3)$$

sendo  $\sigma = 5.68 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  a constante de Stefan-Boltzmann,  $P$  a potência emitida em W,  $A$  a área da superfície radiante em  $\text{m}^2$  e  $T$  a temperatura em K. Analisando a equação acima é observável que ligeiros aumentos de temperatura produzem uma forte alteração na potência irradiada por um objeto. Por exemplo, uma subida de 250 K para 300 K promove uma subida de 229 W para 461 W.

Na figura 3.8 podemos observar a relação potência/temperatura de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann.



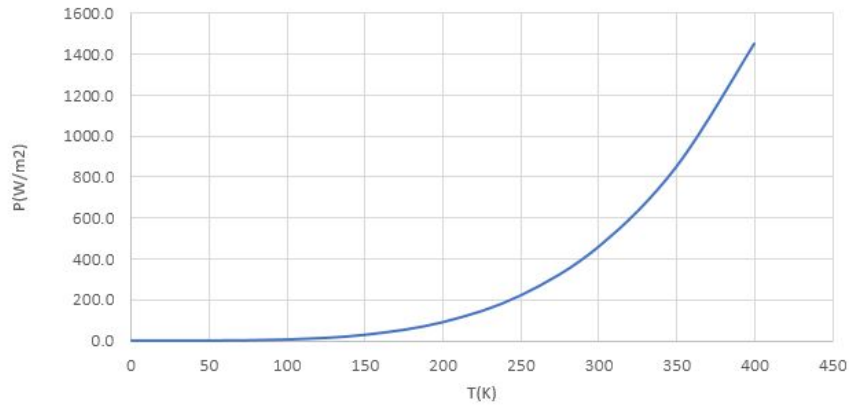
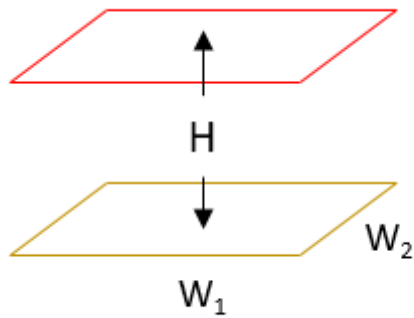


Figura 3.8: Gráfico de energia total emitida em função da temperatura.

#### 3.2.4.2 Fator geométrico

O fator geométrico permite aferir qual a percentagem de radiação emitida pela fonte emissora e que atinge o objeto pretendido. Para um cenário hipotético de dois pratos paralelos, onde o prato superior consiste na área efetiva das lâmpadas infravermelho e o inferior na área do conjunto de rolhas expostas à radiação, o fator geométrico é dado pela equação



$$F_{12} = \frac{1}{\pi xy} \left[ \ln \frac{x_1^2 y_1^2}{x_1^2 + y_1^2 - 1} + 2x(y_1 \arctan \frac{x}{y_1} - \arctan x) + 2y(x_1 \arctan \frac{y}{x_1} - \arctan y) \right] \quad (3.4)$$

com  $H$  a distância entre os pratos,  $x = W_1/H$ ,  $y = W_2/H$ ,  $x_1 = \sqrt{1 + x^2}$  e  $y_1 = \sqrt{1 + y^2}$ . Na figura 3.9 podemos observar a variação do fator geométrico com a proximidade dos pratos para diferentes valores de  $y$ , tendo por base a equação em cima referida.

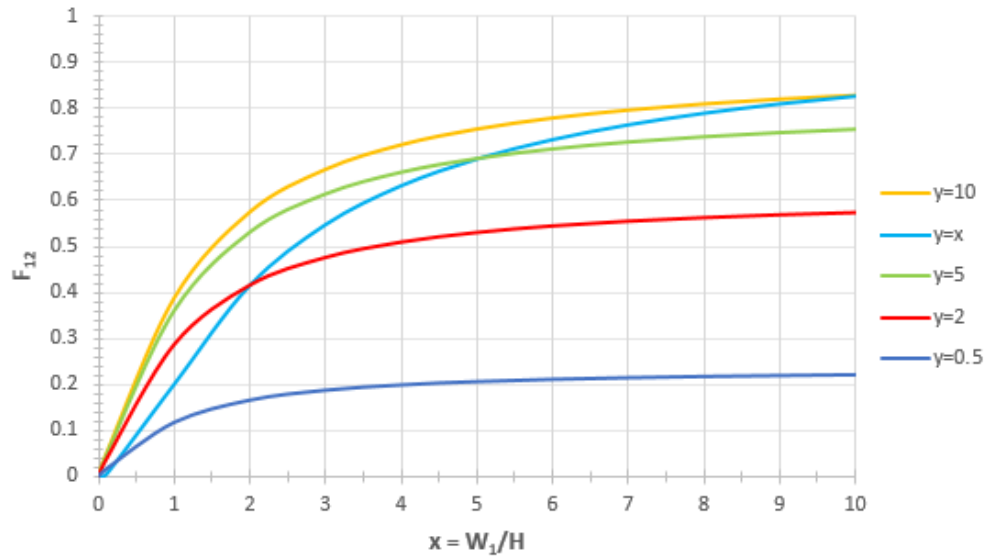


Figura 3.9: Evolução do fator geométrico em função das dimensões e distância entre dois pratos paralelos.

### 3.2.4.3 Emissividade

A emissividade, representada pela letra  $\epsilon$ , consiste na capacidade de um material emitir radiação eletromagnética. Dependendo das suas propriedades físicas, todos os corpos a uma temperatura superior a 0 K emitem radiação eletromagnética, sendo que a sua emissividade varia entre 0 e valores próximos de 1 (apenas um corpo negro apresenta  $\epsilon = 1$ ).

Quando radiação incide na superfície dum corpo esta pode ser absorvida, transmitida ou refletida, sendo que apenas a radiação absorvida contribui para o aquecimento do mesmo.

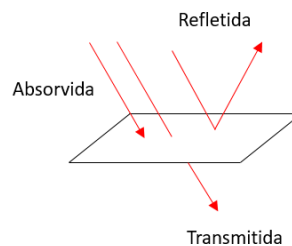


Figura 3.10: Interação da radiação na superfície de um corpo.

Como corpos reais apresentam emissividade inferior a 1, a radiação emitida por um corpo é então dada por

$$\frac{P}{A} = \epsilon \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3.5)$$

com  $\epsilon$  a emissividade do corpo.

Na figura 3.11 é possível observar o impacto da emissividade na energia térmica emitida por um corpo.

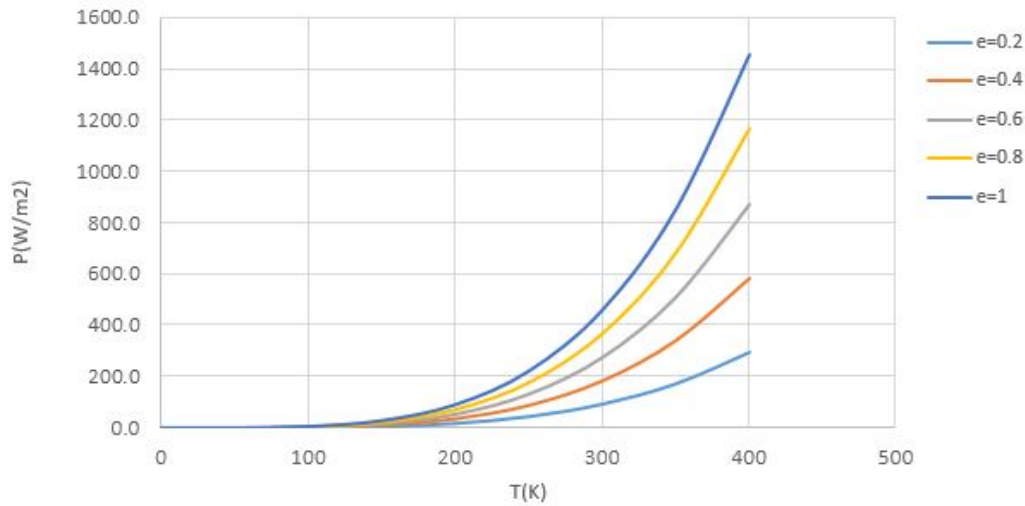


Figura 3.11: Efeito da emissividade na energia emitida por um corpo.

#### 3.2.4.4 Transferência de calor por radiação

Por forma a avaliar-se a eficiência do sistema termodinâmico desenhado é necessário quantificar o tempo necessário ao aquecimento das rolhas de cortiça bem como ter uma perceção das perdas de calor que ocorrem por radiação.

Ao contrário do cálculo de transferência de calor entre corpos negros, trocas de calor entre corpos reais é consideravelmente mais complexa devido ao facto destes refletirem radiação, pelo que nos cálculos realizados se vai assumir que as superfícies são opacas, difusas e cinzentas.

Para um corpo cinzento e opaco ( $\epsilon = \alpha$  e  $\alpha + \rho = 1$ ) e tendo por base a figura 3.12

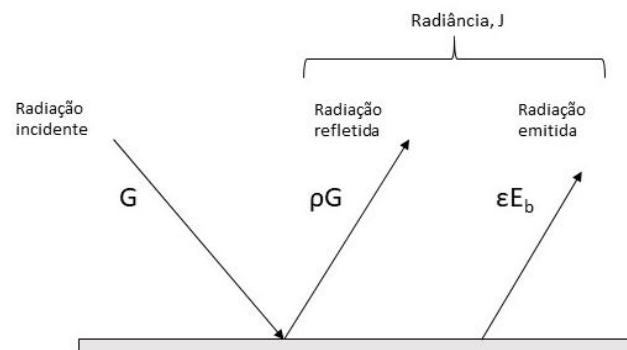


Figura 3.12: A radiância consiste na soma da radiação refletida e emitida.

determina-se que a radiância de um corpo é dada por

$$J_i = \epsilon_i E_{bi} + \rho_i G_i \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3.6)$$

sendo  $E_{bi}$  a potência emitida,  $G_i$  a radiação incidente na superfície e  $\rho_i$  o coeficiente de refletividade do material.

Tendo por base a relação em cima indicada e que a transferência de energia radiante líquida numa superfície genérica é dada pela subtração da radiação que sai da superfície menos a radiação que entra, tem-se que

$$\dot{Q}_i = A_i(J_i - G_i) = A_i \left( J_i - \frac{J_i - \epsilon_i E_{bi}}{1 - \epsilon_i} \right) = \frac{A_i \epsilon_i}{1 - \epsilon_i} (E_{bi} - J_i) \text{ (W)} \quad (3.7)$$

com  $\dot{Q}_i$  a energia radiante líquida da superfície e  $R_i = \frac{1 - \epsilon_i}{A_i \epsilon_i}$  a resistência radiativa da superfície, por analogia à lei de Ohm.

Por sua vez, assumindo duas superfícies aleatórias onde  $J_1$  consiste na radiância da superfície 1 e  $J_2$  a radiância da superfície 2, a transferência de radiação líquida entre duas superfícies é dada por

$$\dot{Q}_{12} = A_1 F_{12} J_1 - A_2 F_{21} J_2 \text{ (W)} \quad (3.8)$$

com  $A_1$  e  $A_2$  as áreas das superfícies,  $F_{12}$  a fração de radiação que sai da superfície 1 e atinge a superfície 2 e  $F_{21}$  a fração de radiação que sai da superfície 2 e atinge a superfície 1.

Aplicando a lei da reciprocidade de fatores geométricos,  $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$  tem-se que

$$\dot{Q}_{12} = A_1 F_{12} (J_1 - J_2) \text{ (W)} \quad (3.9)$$

com  $R_{12} = \frac{1}{A_1 F_{12}}$  a resistência radiativa do espaço entre as superfícies.

Na figura 3.13 podemos observar a transferência de calor entre duas superfícies genéricas tendo por base as suas resistências radiativas de superfície e a resistência radiativa do espaço entre as mesmas.

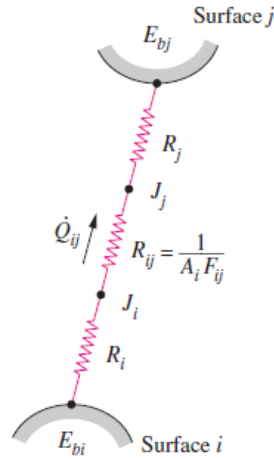


Figura 3.13: Transferência de calor entre duas superfícies tendo por base a analogia a um circuito elétrico [27].

Tendo por base a sua simplicidade e foco nas grandezas físicas associadas à transferência de calor entre superfícies, o método de redes introduzido por A. K. Oppenheim acima referenciado será aplicado no contexto do problema para avaliação do ganho energético das rolhas e tambor ao longo do tempo [27].

### 3.2.5 Manômetros de Pressão

A evolução da pressão na câmara será medida através de um manómetro piezo/pirani, o qual será colocado numa flange de ligação da cabeça torisférica da câmara.

Os manómetros pirani têm por base de funcionamento a condutibilidade térmica, sendo constituídos por um tubo metálico ou de vidro e um filamento quente centrado. A medição da pressão nestes manómetros é feita por análise da variação da resistência deste filamento, que tem uma temperatura de cerca de 120 °C. Quando átomos e moléculas do sistema chocam com o tubo perdem energia térmica pois este encontra-se a uma temperatura mais baixa. O filamento por sua vez perde também calor proporcionalmente ao número de partículas do sistema, o que permite aferir quanto à pressão do mesmo [28].

Os manómetros piezo, por sua vez, medem pressões absolutas determinando a deflexão de um diafragma e medindo a formação de um extensómetro acoplado ao diafragma, sendo que a resposta do sensor não depende do tipo de gás.

Equipamentos atuais incorporam manómetro piezo e pirani cobrindo pressões de alto a médio vácuo. Na figura 3.14 podemos ver um exemplo deste tipo de manómetros.



Figura 3.14: Exemplo de um manómetro piezo/pirani [29].

### 3.2.6 Filtro de poeiras e trapa fria

As rolhas de cortiça, por serem um material orgânico, quando sujeitas a alterações térmicas e de pressão libertam sub-partículas que ao entrarem na linha de vácuo em grandes quantidades podem danificar a bomba, comprometendo todo o processo. Assim, como forma de precaução a bomba de vácuo é protegida com um filtro de poeiras que será colocado imediatamente antes desta.

Na figura 3.15 podemos observar um filtro de poeiras da marca Edwards adaptável a uma trapa química ou dessecante. Após vários ciclos de utilização, estes equipamentos podem ser limpos com o uso de um aspirador ou jato de ar limpo [30].



Figura 3.15: Filtro de Poeiras Edwards [31].

Para além do filtro de poeiras será também incluída uma trapa fria no sistema por forma a impedir que o vapor de água proveniente das rolhas de cortiça condense no óleo da bomba rotativa e o contamine, comprometendo o seu funcionamento.

As trapas frias têm como base de funcionamento a condensação dos vapores forçando-os a passar por um conjunto de bobinas arrefecidas a temperaturas muito baixas. Dependendo do seu método de arrefecimento, as trapas frias podem operar à temperatura ambiente (arrefecidas a água) ou até aproximadamente  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  quando arrefecidas com azoto

líquido. Porque o importante na escolha de uma trapa é que a sua temperatura seja mais baixa que o ponto de congelamento dos vapores a coletar, neste projeto é aconselhável a utilização de uma trapa que funcione entre  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , arrefecida por exemplo com gelo seco e acetona.



Figura 3.16: Trapa fria angular da marca Nor-Cal [32].

### 3.2.7 Bomba de Vácuo

A bomba de vácuo é o elemento principal do sistema de vácuo e é o equipamento responsável pela remoção de gás do interior da câmara. A escolha da mesma depende de vários factores tais como a pressão final desejada e o tempo de bombeamento pretendido, o tamanho da câmara e as características físicas dos materiais expostos ao vácuo.

No sistema em causa a existência de vácuo prende-se fundamentalmente com a necessidade de extrair da câmara o TCA removido das rolhas e evitar fenómenos de re-adsorção, sendo que a pressão final, tal como referido no capítulo 3.2.2 e tendo por base análise laboratorial, implica a escolha de um conjunto de bombas capazes de colocar a câmara de vácuo a uma pressão interna de 0,1 mbar. Como se verificará no capítulo 4, uma só bomba não será suficiente para extrair a quantidade de água que sai das rolhas de cortiça em tempo útil, sendo que se opta por duas bombas em série - uma bomba rotativa será responsável por bombear o sistema a partir da atmosfera e uma bomba *roots* será usada para extrair o vapor de água e levar a câmara à pressão final - sendo o conjunto colocado no chão ao lado da câmara ligado a todos os elementos do sistema através de flanges normalizadas.

Tendo por base a pressão final a alcançar bem como os elementos de ligação, de seguida serão explicitados os conceitos teóricos fundamentais a ter em consideração para a escolha das bombas [28].

### 3.2.7.1 Velocidade de Bombeamento

Num sistema de vácuo a velocidade de bombeamento consiste no volume de gás retirado por segundo através da porta de entrada da bomba e é dada por:

$$S = \frac{dV}{dt} \text{ (L/s)} \quad (3.10)$$

com  $S$  a velocidade de bombeamento da bomba,  $dV$  a variação de volume em litros e  $dt$  a variação no tempo em segundos. Todas as bombas de vácuo apresentam diferentes velocidades de bombeamento, sendo que em primeira instância e tendo apenas por base o volume de gás a remover, a velocidade de bombeamento permite aferir o tempo necessário para atingir uma determinada pressão. No entanto, porque a quantidade de matéria do volume deslocado depende da pressão, a velocidade de bombeamento não descreve a quantidade de partículas que são removidas, sendo que esta quantidade é descrita pelo fluxo  $Q$  que para uma pressão constante é dado por:

$$Q = p \times S \text{ (mbar L/s)} \quad (3.11)$$

com  $p$  a pressão em mbar e  $S$  a velocidade de bombeamento em L/s. O fluxo  $Q$  consiste no somatório de três fluxos com origens distintas:

- $Q_g$ : corresponde ao fluxo de gases que se encontram inicialmente na câmara
- $Q_d$ : fluxo proveniente da desgaseificação dos materiais em contacto com o vácuo
- $Q_f$ : fluxo devido a fugas e permeabilidade dos materiais

sendo que num sistema livre de fugas, a pressão final passível de ser alcançável é limitada pela desgaseificação dos materiais.

### 3.2.7.2 Condutância

A condutância  $C$  define-se como o inverso da resistência à passagem dos gases por entre os elementos de ligação entre a câmara e a bomba tais como flanges, tubos, válvulas e outros elementos de ligação que afetam a velocidade de bombeamento, o que por sua vez afeta o tempo necessário para atingir a pressão final desejável. Desta forma, e por forma a fazer-se um correto dimensionamento do sistema de vácuo, os fundamentos teóricos principais para o cálculo da condutância são de seguida abordados.

Tendo por base a figura 3.2, onde a câmara se encontra ligada à bomba através de uma flange, o inverso da velocidade de bombeamento é dada por

$$\frac{1}{S} = \frac{p}{Q} \quad (3.12)$$

onde a pressão à entrada da bomba está relacionada com a pressão da câmara pela relação



$$Q = C(p - p_b) \Leftrightarrow p = \frac{Q}{C} + p_b \quad (3.13)$$

Substituindo a equação 3.13 na equação 3.12 obtemos a relação

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{C} + \frac{p_b}{Q} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_b} \quad (3.14)$$

sendo  $p_b$  a pressão à entrada da bomba,  $S_{eff}$  a velocidade de bombeamento efetiva e  $S_b$  a velocidade da bomba. Esta relação permite assim aferir a velocidade de bombeamento efetiva em função da condutância e a velocidade de bombeamento da bomba.

Para além do número de elementos que percorrem a ligação entre a bomba e a câmara, a condutância total de um sistema de vácuo define-se também pelo tipo de fluxo de gases que percorrem estes elementos, podendo este ser geralmente classificado em quatro regimes diferentes:

- Regime turbulento: tipo de fluxo que ocorre quando um sistema é bombeado a partir da atmosfera caracterizado pela presença de remoinhos e oscilações de velocidade apresentando um comportamento "errático", sendo que pode também ocorrer quando se admite gás num sistema já em vácuo.

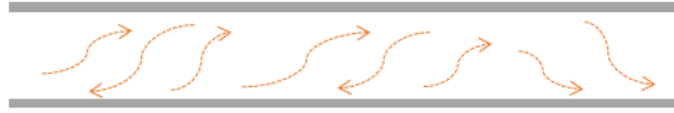


Figura 3.17: Fluxo Turbulento.

- Regime viscoso ou laminar: tipo de fluxo caracterizado por uma baixa velocidade de gás que se desloca em camadas finas sobrepostas com maior velocidade na parte central do tubo e praticamente nula junta às paredes.

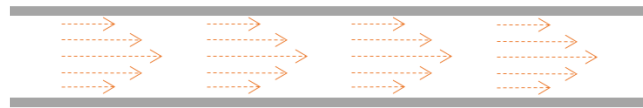


Figura 3.18: Fluxo Laminar.

No regime viscoso a condutância de um tubo cilíndrico a 20 °C é dada pela relação

$$C(L/s) = 134 \times \frac{D^4}{L} \times p_m \quad (3.15)$$

sendo  $D$  o diâmetro e  $L$  o comprimento do tubo em cm respetivamente, e  $p_m$  a pressão média dentro do tubo em mbar.

- Regime molecular: tipo de fluxo que ocorre a baixas pressões onde o livre percurso médio das moléculas é superior ao diâmetro do tubo não existindo choque entre moléculas



Figura 3.19: Fluxo Molecular.

No regime molecular a condutância num tubo para o qual o comprimento é 20 vezes superior ao seu diâmetro é dada por

$$C(L/s) = 12,1 \times \frac{D^3}{L} \quad (3.16)$$

- Regime intermédio ou de Knudsen: tipo de fluxo que ocorre na transição de um fluxo viscoso para um fluxo molecular onde ambos coexistem. Neste fluxo a velocidade do gás junto às paredes do tubo não pode ser considerada nula. No regime intermédio a condutância no tubo é dada pelo somatório das condutâncias no regime viscoso e molecular:

$$C(L/s) = 134 \times \frac{D^4}{L} p_m + 12,1 \times \frac{D^3}{L} \quad (3.17)$$

A transição de um regime turbulento para um regime viscoso ou laminar é determinada a partir do número de Reynolds, que para o ar a 20 °C é dado por

$$Re = \frac{8,3 \times Q}{D} \quad (3.18)$$

sendo que o regime será turbulento se  $Q > 250D$  e viscoso se  $Q < 250D$ .

Por sua vez, a transição de um regime viscoso para um regime molecular é determinada pelo número de Knudsen, que consiste numa relação entre o livre percurso médio das partículas gasosas e do diâmetro do tubo:

$$K_n = \frac{\lambda}{D} = \frac{1}{D} \times \frac{7 \times 10^{-3}}{p} \quad (3.19)$$

O fluxo será viscoso se  $K_n < 10^{-2}$  e molecular se  $K_n > 1$ .

### 3.2.7.3 Tempo de bombeamento

Todas as bombas de vácuo apresentam curvas de desempenho que permitem aferir a velocidade de bombeamento com base na pressão desejável de ser atingida. Nas figuras

3.20 e 3.21 podemos observar as curvas de desempenho para uma bomba *scroll* XDS35i e rotativa RV12 de dois estágios, respetivamente.

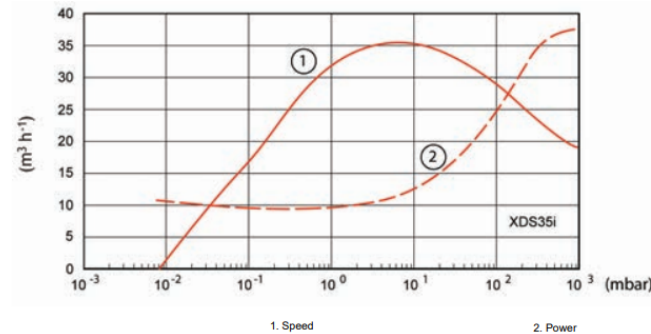


Figura 3.20: Curva de desempenho de uma bomba *scroll* [33].

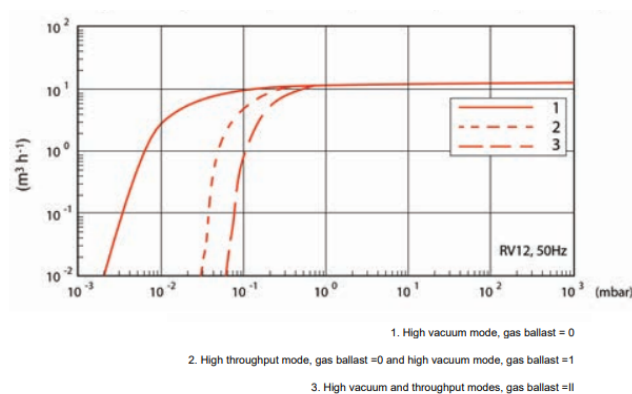


Figura 3.21: Curva de desempenho de uma bomba rotativa [33].

Por análise das curvas podemos observar que a bomba rotativa mantém uma velocidade de bombeamento constante até uma pressão de 0,1 mbar, ao contrário da bomba *scroll* que tem uma velocidade de bombeamento oscilante com um máximo próximo de 10 mbar, tendendo a decrescer à medida que a pressão diminui (apesar de ter sempre uma velocidade de bombeamento superior até 0,1 mbar). É também de notar que estas curvas dizem respeito apenas à velocidade da bomba e não à velocidade efetiva, pois tal como já mencionado, esta velocidade depende de várias variáveis tais como a condutância de todos os elementos que fazem a ligação da bomba à câmara.

### 3.2.8 Controlador

Por forma a garantir-se um acompanhamento de todo o processo, os elementos principais de pressão, temperatura e rotação deverão estar ligados a controladores apropriados montados num bastidor vertical, os quais permitam uma visualização de todas as grandezas ao longo do tempo. Apesar deste tema não ser aqui abordado em profundidade, é expectável que o controlador permita, em modo automático, realizar todas as fases fundamentais do processo:

- Controlar o arranque da bomba;
- Abertura da válvula de ventilação (ou vapor);
- Arranque da rotação do motor;
- Controlo da temperatura em modo PID permitindo ligar, desligar e definir vários segmentos de potência para as lâmpadas;

### 3.2.9 Motor Elétrico

O motor elétrico é um dispositivo eletromecânico que converte a energia elétrica que recebe da rede em energia mecânica. Neste projeto o motor é usado para induzir rotação ao tambor que por sua vez harmoniza a temperatura das rolhas, sendo que a sua ligação à câmara é feita através de um veio que tem entrada na cabeça torisférica da câmara.

Os motores AC assíncronos (ou de indução) têm como princípio fundamental a criação de um campo magnético girante no estator ao ser alimentado por uma corrente alternada, que por sua vez gera uma corrente no rotor. Esta corrente induzida gera um campo externo que tende a opor-se ao campo criado pelo estator. Porque pólos opostos se atraem, os pólos negativos do rotor tendem a acompanhar os pólos positivos do campo girante e vice-versa, que origina um binário/torque no rotor.

Apesar da alteração de velocidade não ser feita de uma forma direta como nos motores CC, pois a velocidade num motor AC depende da frequência de tensão e da corrente, a calibração da velocidade é facilmente alcançável com um inversor de frequência.

Devido à sua maior simplicidade, custo de manutenção reduzido, largo espectro de potências aplicáveis e porque na indústria a alimentação da rede costuma ser trifásica, o motor AC é o motor habitualmente utilizado, sendo o motor escolhido para este projeto [34].

Na figura 3.22 podemos observar os componentes principais de um motor AC.

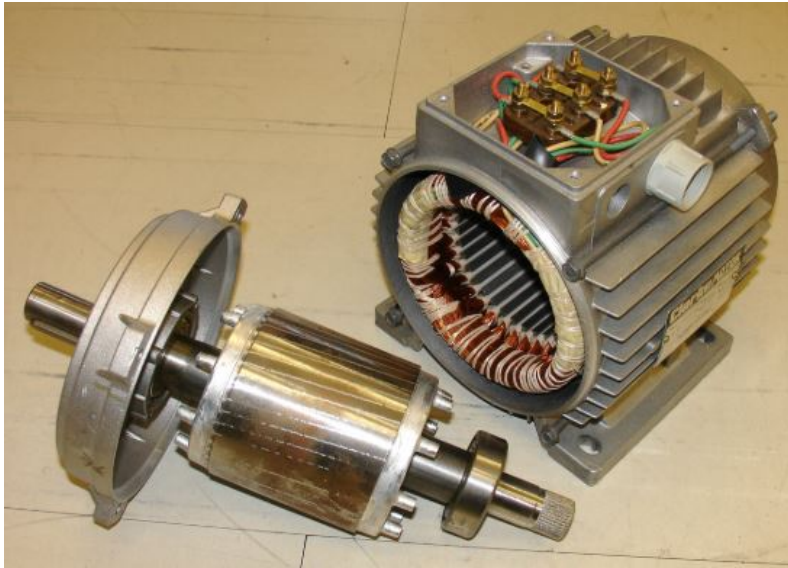


Figura 3.22: Componentes principais de um motor elétrico AC [35].

Por forma a ser feita uma escolha correta do motor a aplicar ao sistema as seguintes grandezas físicas são determinadas:

- Momento de inércia do tambor e de todos os elementos de ligação entre o tambor e o motor;
- Torque passivo (de arranque) e de aceleração;
- Potência do motor necessária;

O momento de inércia consiste na resistência que um material exibe à aceleração em torno de um eixo, ou seja, inércia de rotação.

O momento de inércia de qualquer objeto é dado por

$$I = \int_0^m r^2 dm \quad (3.20)$$

sendo que quanto mais distante a massa se encontra do eixo de rotação, menor a força necessária de ser aplicada para fazê-la girar.

O tambor no qual são colocadas as rolhas de cortiça pode, em primeira instância, ser aproximado a um cilindro oco de espessura desprezável e densidade  $\rho = \frac{m}{V}$ , como se mostra na figura 3.23.

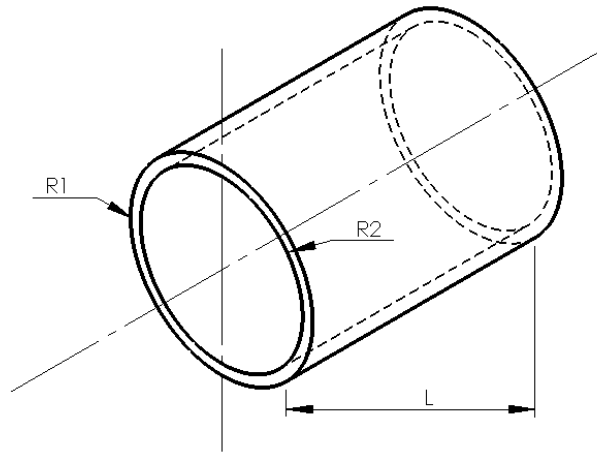


Figura 3.23: Cilindro representativo do tambor com indicação dos raios interno (2) e externo (1).

Considerando que a espessura do tambor pode ser desprezável face ao seu comprimento ( $r_1 \approx r_2$ ), o momento de inércia do tambor é dado por:

$$I = mr^2 \text{ (kg m}^2\text{)} \quad (3.21)$$

com  $m$  a massa e  $r$  o raio do tambor, respetivamente. A força necessária para fazer um objeto rodar em torno de um eixo denomina-se de torque e cuja relação com o momento de inércia é dada por

$$\tau = I\alpha \text{ (Nm)} \quad (3.22)$$

com  $\alpha$  a aceleração angular em  $\text{rad/s}^2$  do objeto em rotação. A potência de um objeto em rotação por sua vez é dado por

$$P = \tau\omega \text{ (W)} \quad (3.23)$$

com  $\omega$  a velocidade angular em  $\text{rad/s}$ .

Porque os motores regra geral apresentam uma velocidade nominal (rpm) muito superior às 10 rpm necessárias para rodar o tambor, este terá que ser acoplado a um redutor e/ou conjunto de rodas dentadas que permitam diminuir a velocidade final do conjunto. Na figura 3.24 podemos observar um esquemático desta ligação.

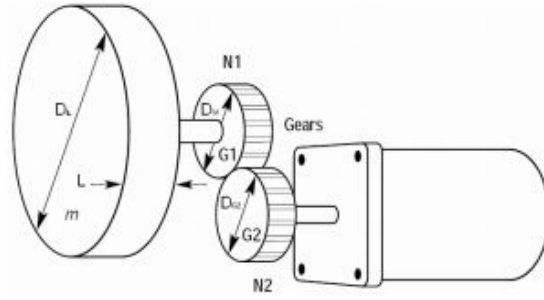


Figura 3.24: Transmissão de movimento de um motor com acoplamento de rodas dentadas [36].

Na configuração acima representada o momento de inércia total do sistema deverá ser calculado tendo em conta as rodas dentadas e a sua relação de transmissão. Assim, tem-se que:

$$\begin{aligned}
 I_{tambor} &= \frac{1}{4} \times m_{tambor} \times d_{tambor}^2 \times \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \\
 I_{roda_1} &= \frac{1}{8} \times m_{roda_1} \times d_{roda_1}^2 \times \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \\
 I_{roda_2} &= \frac{1}{8} \times m_{roda_2} \times d_{roda_2}^2 \\
 I_{sistema} &= I_{tambor} + I_{roda_1} + I_{roda_2} + I_{motor} \text{ (kg m}^2\text{)}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

com  $N_1$  e  $N_2$  o número de dentes das rodas dentadas.

Sabendo o momento de inércia do sistema tem-se que o torque de aceleração (ativo) é dado por

$$T_a = I_{sistema} \times \alpha \text{ (Nm)} \tag{3.25}$$

e o torque de carga, ou passivo, no veio do motor pode ser aproximado a

$$T_l = \frac{Fd}{2} \text{ (Nm)} \tag{3.26}$$

sendo que  $F \approx \mu \times m$ , com  $\mu$  o coeficiente de atrito,  $m$  a massa e  $d$  o diâmetro do cilindro, respetivamente. O torque total necessário do motor tem que respeitar a relação

$$T_m = (T_a + T_l) \times \eta \text{ (Nm)} \tag{3.27}$$

sendo que  $\eta$  consiste num fator de segurança entre 1,5 e 2.

As rodas dentadas, dependendo da sua relação de transmissão, permitem fazer uma redução da velocidade inicial do motor e adaptá-la à rotação final desejada.

Na figura 3.25 podemos observar as dimensões principais de engrenagens cilíndricas.

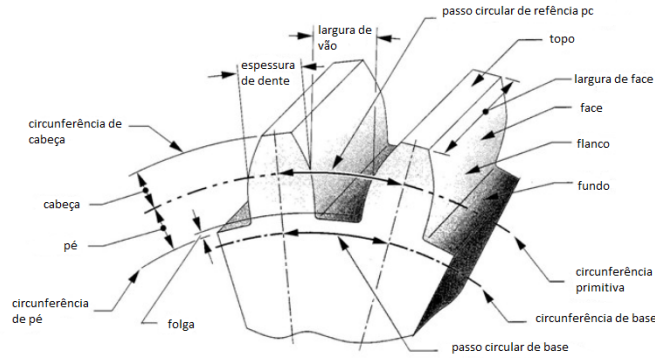


Figura 3.25: Dimensões principais de engrenagens cilíndricas. Adaptado de [37].

Por definição da velocidade de saída do motor e a velocidade final pretendida a relação de transmissão das engrenagens pode ser determinada por

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{d_{01}}{d_{02}} = \frac{z_1}{z_2} \quad (3.28)$$

sendo que  $n_1$ ,  $d_{01}$  e  $z_1$  dizem respeito à velocidade, diâmetro da circunferência primitiva e número de dentes da *roda* (roda maior e portanto com maior número de dentes) e  $n_2$ ,  $d_{02}$  e  $z_2$  ao *carreto*, respectivamente.

Para além da relação de transmissão, o módulo das engrenagens pode ser definido pela divisão do passo por  $\pi$ , ou seja

$$m = \frac{t}{\pi} \quad (3.29)$$

ou, tendo por base o diâmetro da circunferência e o número de dentes da roda

$$m = \frac{d_0}{z} \quad (3.30)$$

com  $m$  o módulo e  $t$  o passo da engrenagem, respectivamente.

Por fim, a distância entre a roda e o carreto é dada por

$$L = \frac{d_{01} + d_{02}}{2} \quad (3.31)$$

Com base nas equações acima referidas e aproximações necessárias (determinadas grandezas como o coeficiente de atrito só pode ser realmente determinada com ensaios práticos), a potência total do motor necessária para uma eficaz rotação do tambor é determinada com base no torque total de todos os elementos do sistema.



### 3.2.10 Apoios da câmara

Os apoios da câmara permitem conferir estabilidade ao longo de todo o processo, sendo que devem também estes ser dimensionados para suportar a carga da câmara e de todos os equipamentos principais que contribuam para o peso total do conjunto.

Nas figuras 3.26 e 3.27 podemos observar o aspeto típico dos apoios de uma câmara de vácuo horizontal e as principais grandezas a considerar para o seu dimensionamento.

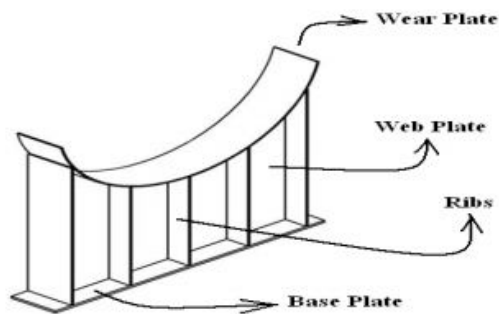


Figura 3.26: Imagem genérica do apoio de um câmara de pressão horizontal [38].

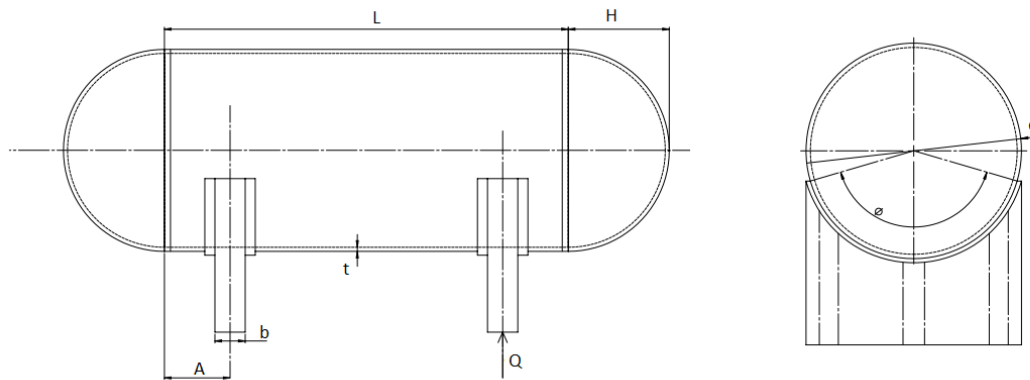


Figura 3.27: Vistas da câmara de pressão com grandezas relevantes ao dimensionamento dos apoios. Desenhado com base em [23].

Tendo por base as dimensões representadas na figura 3.27 e as equações referidas em [23] (páginas 89, 90 e 91) o cálculo das tensões longitudinal, tangencial e circunferencial serão realizados para garantir que os apoios estão em conformidade com as dimensões do projeto por forma a prevenir futuras correções, nomeadamente na simulação de pressão. No entanto, e porque estes cálculos são similares aos cálculos realizados para definição da espessura da câmara e da porta/cabeça, no capítulo 4 mostrar-se-á apenas o resultado final e as grandezas consideradas.

### 3.2.11 Cabeça e porta de abertura rápida

De acordo com o código ASME existem três tipos distintos de cabeças aplicáveis a uma câmara de pressão: hemisférica, elipsoidal e torisférica. Na figura seguinte podemos observar as suas diferenças estruturais e dimensionais.

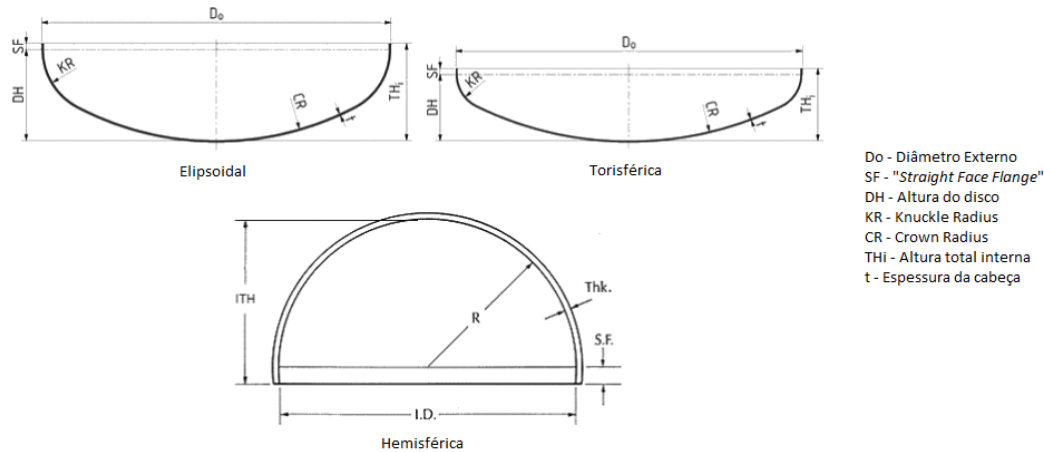


Figura 3.28: Diferentes tipos de cabeças para câmaras de pressão [39].

Dentro dos três tipos de cabeça acima representados, a cabeça torisférica é a mais económica e é tipicamente utilizada para pressões inferiores a 15 bar sendo que, e tendo por base a especificidade do projeto e as condições de operação do mesmo, a cabeça da câmara e porta serão dimensionadas com esta estrutura.

A espessura da cabeça e porta podem, tal como a espessura da câmara, ser avaliadas tendo por base a pressão máxima de trabalho admissível, com recurso à relação

$$P_a = \frac{B}{\frac{R_0}{t}} \quad (3.32)$$

sendo que o fator B é calculado ao determinar-se o fator  $A = 0,125/(R_0/t)$  e intersetando-o com a temperatura de trabalho recorrendo à figura 3.7 com  $R_0 = R_{CR} = D_0$  para cabeças torisféricas.

## RESULTADOS

### 4.1 Câmara de vácuo

Por forma a determinar-se uma geometria da câmara que suporte as condições de trabalho, é necessário em primeira instância ter-se uma perceção do volume ocupado pelo conjunto de rolhas e consequentemente definir um diâmetro e comprimento adequados para o tambor rotativo.

Assim, admitindo que uma rolha de cortiça perfaz um volume de  $20 \text{ cm}^3$  (como especificado em 3.2.1.1), 20000 rolhas ocupam um volume de  $0,4 \text{ m}^3$ .

Sendo que a câmara deverá ter capacidade para suportar o tambor rotativo e que por questões de eficiência e maximização de aquecimento o tambor deverá ter um volume duas vezes superior ao volume ocupado pelas rolhas, determina-se um volume necessário de  $0,8 \text{ m}^3$ .

Porque que o tambor apresenta uma estrutura cilíndrica e o seu volume é dado por

$$V_{\text{tambor}} = \pi \times r^2 \times l \Leftrightarrow l = \frac{V_{\text{tambor}}}{\pi \times r^2} \quad (4.1)$$

com recurso a uma folha de *Excel* e considerando as grandezas acima mencionadas opta-se por um comprimento  $l = 1,6 \text{ m}$  e raio  $r = 0,4 \text{ m}$ .

Tendo determinado as dimensões do tambor é então possível aferir uma configuração da câmara que suporte o mesmo e consequentemente definir uma espessura que respeite a pressão de trabalho.

Porque os gráficos 3.5, 3.6 e 3.7 apresentam as unidades em *inches* e *Fahrenheit*, as unidades de medida aqui usadas serão convertidas na unidade indicada.

Considerando a figura 3.5 e uma temperatura máxima de trabalho de  $180^\circ\text{C}$ , partindo de um comprimento  $L = 1,8 \text{ m} \approx 70,8661 \text{ in.}$  e diâmetro externo  $D_o = 1,05 \text{ m} = 41,34 \text{ in.}$  para a câmara determina-se a um valor de espessura  $t = 0,18 \text{ in.} \approx 5,1 \text{ mm.}$

Atribuindo um valor de espessura à câmara é possível resolver o fatores  $A$  e  $B$  com recurso às figuras 3.6 e 3.7, respetivamente.

Sendo que  $\frac{L}{D_0} \approx 1,71$  e  $\frac{D_0}{t} \approx 229,7$  chega-se a um fator  $A \approx 0,0002$ .

Por sua vez o fator  $B$  é calculado intersectando o fator  $A$  previamente calculado com a linha de temperatura correspondente, neste caso aproximada a  $400^\circ\text{F} = 204,44^\circ\text{C}$ , sendo que se obtém assim um valor  $B \approx 2600$ .

Através da fórmula 3.1 chegamos a um valor de  $P_a$ :

$$P_a = \frac{4 \times 2600}{3 \times 229,7} = 15,1 \text{ (psi)} \approx 1041,1 \text{ (mbar)} \quad (4.2)$$

Como a câmara está sujeita a uma pressão externa de 1013,15 mbar, que é inferior à pressão admissível de trabalho, garante-se assim que uma espessura de 5,1 mm é suficiente para as condições de trabalho.

A construção da cabeça da câmara e porta, ambas de geometria torisférica com o raio da coroa (*crown radius*) igual ao diâmetro externo da câmara,  $R_{CR} = D_0 = 41,34 \text{ in.} = 1,05 \text{ m}$  e espessura  $t = 0,18 \text{ in.} = 5,1 \text{ mm}$  apresentam um valor de  $A$ :

$$A = \frac{0,125}{\frac{R_0}{t}} = \frac{0,125}{\frac{41,34}{0,18}} = 0,00054 \quad (4.3)$$

Com recurso ao gráfico 3.7 temos um valor de  $B \approx 4800$  e assim, a pressão admissível de trabalho nestas condições é de

$$P_a = \frac{B}{\frac{R_0}{t}} = \frac{4800}{\frac{41,34}{0,18}} = 21 \text{ (psi)} \approx 1447,89 \text{ (mbar)} \quad (4.4)$$

que é superior à pressão de trabalho, pelo que a mesma espessura aplicada à câmara pode ser aplicada à cabeça e porta da câmara. Na figuras 4.1 e 4.2 podemos observar a construção da câmara com a porta e cabeça lateral dimensionadas em *SolidWorks*.



Figura 4.1: Vista isométrica da câmara com foco na cabeça torisférica.



Figura 4.2: Vista isométrica da câmara com foco na porta lateral.

Na figura 4.1 a cabeça apresenta quatro flanges distintas. As duas flanges opostas mais acima serão usadas para o sistema de vácuo sendo que a flange à direita serve de ligação a todo o sistema e a da esquerda será usada para complementar com um manómetro de pressão ou, na eventualidade de ser necessário baixar ainda mais a pressão, utilizar-se para acoplamento a outra bomba de vácuo. A flange central serve de suporte ao sistema térmico sendo que tanto as ligações das lâmpadas como o próprio suporte das mesmas será encaixado nesta flange. Por fim, a flange mais abaixo é utilizada para ligação ao motor elétrico.

Na figura 4.2 a porta tem apenas uma flange central que pode ser utilizada para ligação a uma trapa na necessidade de condensar ceras da cortiça e evitar que estas se desloquem para a linha de vácuo. Esta trapa e as ligações necessárias não são abordadas neste projeto. A câmara em si apresenta também duas flanges genéricas na eventualidade de ser necessário acrescentar equipamentos adicionais.

## 4.2 Suportes câmara

Por forma a calcular-se as tensões longitudinal, tangencial e circunferencial que permitem aferir a estabilidade dos apoios, as dimensões referenciadas na figura 3.27 utilizadas foram:

Tabela 4.1: Dimensões usadas para cálculo das tensões aplicadas aos apoios.

	<b>A</b>	<b>L</b>	<b>R<sup>1</sup></b>	<b>H</b>	<b>t</b>	<b>b</b>
mm	464	1876,2	525	207	4,1	152,4
in.	18,27	73,86	20,7	8,15	0,18	6

Para além das dimensões em cima mencionadas, considerou-se também uma massa total aplicada  $Q = 550$  kg tendo por base o peso da câmara, tambor e rolhas. Após se verificar que as dimensões aplicadas respeitam as tensões máximas admitidas pela norma, procedeu-se à construção dos apoios, representados na figura 4.3

---

<sup>1</sup>A grandeza R não se encontra identificada na figura 3.27 mas consiste no raio da câmara, ou seja,  $d/2$ .

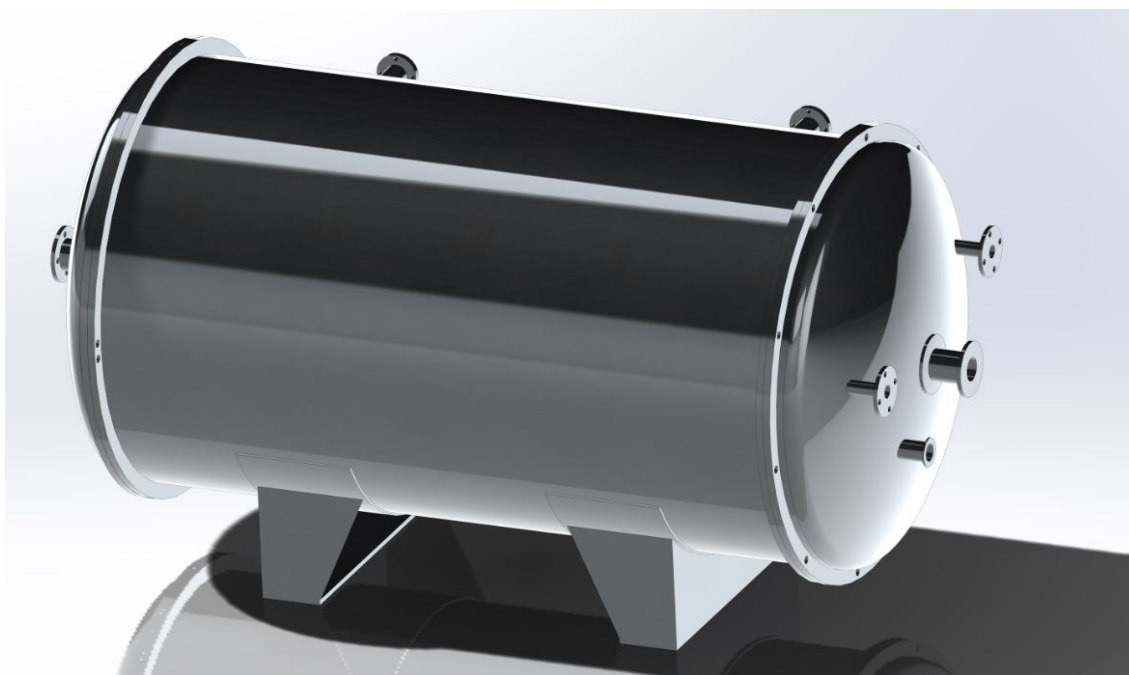


Figura 4.3: Vista isométrica da câmara de pressão com apoios.

### 4.3 Sistema de vácuo

O sistema de vácuo tem como objetivo retirar o TCA desadsorvido das rolhas de cortiça e, por definição do projeto, deverá ser capaz de colocar a câmara a uma pressão interna de 0,1 mbar.

Em circunstâncias normais e sendo um volume relativamente pequeno - com recurso ao *SolidWorks* verifica-se que a câmara apresenta na sua totalidade um volume de 1,84 m<sup>3</sup> - descer a pressão da câmara até 0,1 mbar é relativamente simples e rápido.

Com recurso à relação

$$S = \frac{V}{t} \times \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \text{ (m}^3\text{/h)} \quad (4.5)$$

que permite averiguar a velocidade de bombeamento necessária para descer a pressão de um sistema a partir da pressão atmosférica, tendo por base o volume de gás presente e o tempo desejado, onde  $S$  consiste na velocidade da bomba de vácuo,  $V$  o volume a retirar,  $t$  o tempo necessário e  $p_0$  e  $p$  as pressões inicial e final, respetivamente, verifica-se que uma bomba com uma velocidade de aproximadamente 34,12 m<sup>3</sup>/h seria suficiente para colocar a câmara a uma pressão de 0,1 mbar em cerca de 30 minutos (desconsiderando a condutância dos elementos de ligação).

No entanto, e tendo por base resultados experimentais, verifica-se que a aproximadamente 5 mbar a água presente nas rolhas começa a ser libertada e a evaporar. Dado que o total de rolhas pesam 70 kg e cada rolha tem cerca de 8 % de humidade, determina-se que 5,6 kg correspondem a água. Avaliando esta massa em número de moles e sabendo

que a massa molar da água é de  $M = 18,01528$  g/mol tem-se que o número de moles de água é de

$$n_{\text{agua}} = \frac{5,6 \times 10^3}{18,01528} = 310,85 \text{ (mol)} \quad (4.6)$$

Tendo por base o número de moles determinado e assumindo que o vapor de água libertado pode ser aproximado a um gás ideal através da relação  $P.V = n.R.T$ , com  $R$  a constante universal dos gases reais em  $\text{L mbar K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ,  $T$  a temperatura em K,  $p$  a pressão em mbar e  $V$  o volume em L, com recurso a uma folha *Excel* determinou-se o volume ocupado pelo vapor para pressões entre 0,1 mbar e 5 mbar. Na figura 4.4 podemos observar os resultados obtidos.

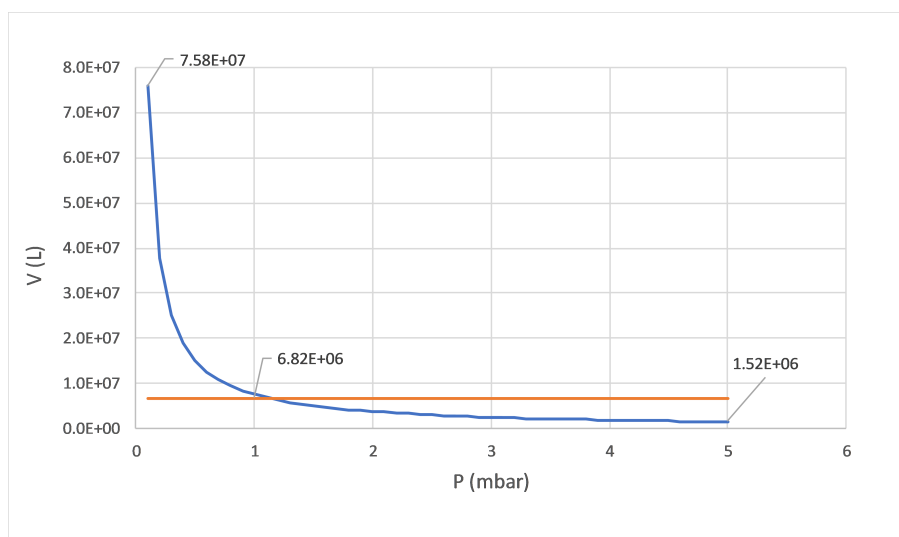


Figura 4.4: Variação do volume ocupado pelo vapor de água das rolhas de cortiça em função da pressão à temperatura ambiente (linha azul) com indicação do volume médio (linha laranja).

Por observação do gráfico acima representado verifica-se que a pressão interna da câmara tem um forte impacto no volume ocupado pelo vapor de água, o qual apresenta ordens de grandeza muito elevadas e que não podem ser desprezadas. No entanto, sendo difícil determinar empiricamente o volume total de vapor a retirar (porque a remoção do mesmo é um processo dinâmico), o volume considerado nos cálculos seguintes será o volume médio indicado no gráfico de valor  $6,82 \times 10^6$  L.

Como demonstrado e sendo expectável que o processo de remoção de todo o vapor de água da câmara seja demorado, o sistema de vácuo foi dimensionado com uma bomba *roots* em série com uma bomba rotativa, como se mostra na figura 4.5.



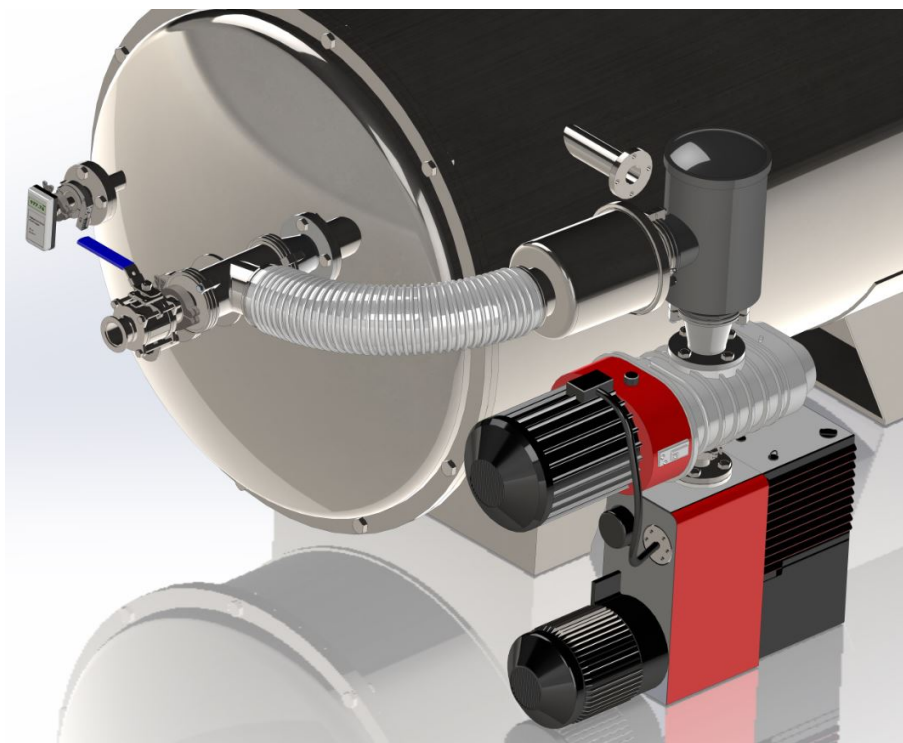


Figura 4.5: Sistema de vácuo incorporado na câmara.

No conjunto representado, a bomba rotativa (em baixo) será responsável pelo regime de pré-vácuo levando a câmara a uma pressão próxima de 5 mbar, sendo que a bomba *roots* terá a função de remover todo o vapor de água e levar a pressão aos 0,1 mbar necessários. Ao contrário da bomba rotativa, esta não é vedada a óleo e consegue atingir velocidades mais altas (apesar de não bombear a partir da pressão atmosférica).

Em cima da bomba *roots* encontra-se um filtro de poeiras ligado em série à trapa fria que através de um tubo flexível faz a ligação à câmara e a uma válvula do tipo globo que permite entrada de ar no sistema. As dimensões dos tubos aplicados são do tipo ISO-KF 100, os quais apresentam um diâmetro interno de 98 mm <sup>2</sup>.

Assumindo uma velocidade de 1900 m<sup>3</sup>/h para a bomba *roots* e de 350 m<sup>3</sup>/h para a bomba rotativa, a condutância dos elementos de ligação é de seguida calculada para os vários regimes de bombeamento por forma a averiguar a eficiência do sistema e determinar o tempo total de bombeamento necessário.

<sup>2</sup>As bombas de vácuo, filtro de partículas bem como o tubo flexível foram desenhados de raiz. As restantes ligações, sendo normalizadas foram retiradas de [40].

### 4.3.1 Regime Turbulento

Tal como referido no capítulo 3 a transição de um regime turbulento para um regime viscoso é determinado pelo número de Reynolds, sendo que para o ar o regime é turbulento se  $Q > 250D$  e viscoso se  $Q < 120D$ .

Sendo o diâmetro interno das flanges de ligação de aproximadamente 10 cm e a velocidade da bomba rotativa de 350 m<sup>3</sup>/h (assume-se a velocidade da bomba rotativa como a velocidade de referência pois é a bomba responsável por bombear o sistema a partir da atmosfera e a que tem velocidade mais baixa) temos que o regime é turbulento para

$$Q > 250 \times 10 > 2500 \Leftrightarrow p > \frac{2500}{97,22} > 25,7 \text{ (mbar)} \quad (4.7)$$

e viscoso para

$$Q < 120 \times 10 < 1200 \Leftrightarrow p < \frac{1200}{97,22} < 12,34 \text{ (mbar)} \quad (4.8)$$

Na figura 4.6 podemos observar a evolução do número de Reynolds e o fluxo  $Q$  com a variação da pressão.

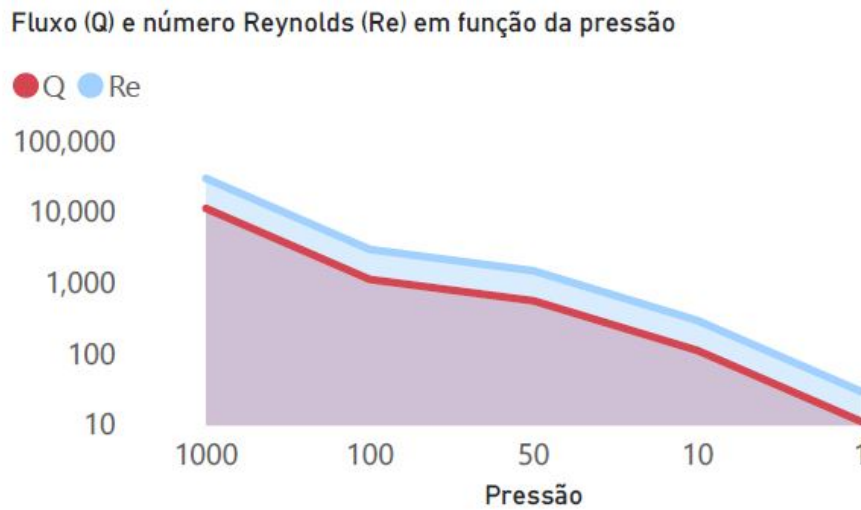


Figura 4.6: Progressão do número de Reynolds e fluxo  $Q$  em função da pressão.

Sendo que apenas nos momentos iniciais de bombeamento o fluxo é turbulento a análise de condutâncias neste regime não tem grande relevância, especialmente num sistema de baixas pressões.

### 4.3.2 Regime Viscoso

A transição do regime viscoso para o regime molecular é dado pelo número de Knudsen:

$$K_n = \frac{\lambda}{D} \quad (4.9)$$

sendo  $\lambda$  dado por

$$\lambda = \frac{7 \times 10^{-3}}{p} \quad (4.10)$$

para o ar a 20 °C.

O regime será viscoso para valores de  $K_n < 10^{-2}$  e molecular para  $K_n > 1$ , ou seja:

$$p > \frac{7 \times 10^{-3}}{10^{-2} \times 10} \Leftrightarrow p > 0,07 \text{ (mbar)} \quad (4.11)$$

para regime viscoso e

$$p < \frac{7 \times 10^{-3}}{1 \times 10} \Leftrightarrow p < 7 \times 10^{-4} \text{ (mbar)} \quad (4.12)$$

para o regime molecular.

Verifica-se assim que o regime predominante durante o bombeamento do sistema está compreendido entre 0,1 mbar e 12,34 mbar, que corresponde ao regime viscoso. Tendo por base as figuras 4.7 e 4.8 em baixo representadas e a tabela 4.2 onde se encontram as dimensões dos tubos de ligação, as condutâncias neste regime são de seguida calculadas.



Figura 4.7: Vista de topo do sistema de vácuo com indicação das condutâncias a calcular.

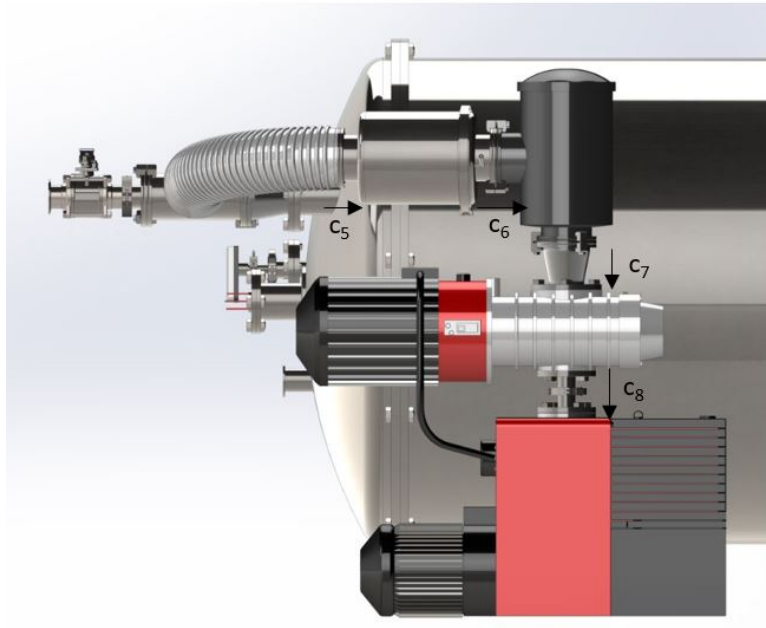


Figura 4.8: Vista lateral do sistema de vácuo com indicação das condutâncias a calcular.

Tabela 4.2: Tabela com dimensões do diâmetro e comprimento das flanges de ligação do sistema de vácuo.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Diâmetro (cm)	8,514	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	8,514	6,3
Comprimento (cm)	10,104	10,8	10,8	57	6,765	7,838	10,04	6,54

Tendo por base as dimensões da tabela 4.2 e com recurso à equação 3.15, tem-se que as condutâncias nas flanges são de:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 134 \times \frac{8,514^4}{10,104} \times 0,1 = 6968,6 \text{ (L/s)} \\
 C_2/C_3 &= 134 \times \frac{9,8^4}{10,8} \times 0,1 = 11444,2 \text{ (L/s)} \\
 C_4 &= 134 \times \frac{9,8^4}{57} \times 0,1 = 2168,4 \text{ (L/s)} \\
 C_5 &= 134 \times \frac{9,8^4}{6,765} \times 0,1 = 18270,12 \text{ (L/s)} \\
 C_6 &= 134 \times \frac{9,8^4}{7,838} \times 0,1 = 15768,99 \text{ (L/s)} \\
 C_7 &= 134 \times \frac{8,51^4}{10,04} \times 0,1 = 6999,86 \text{ (L/s)} \\
 C_8 &= 134 \times \frac{6,3^4}{6,54} \times 0,1 = 3227 \text{ (L/s)}
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

As condutâncias do filtro de poeiras e da trapa não foram contabilizadas pois não foram encontrados dados relativos às mesmas para estas dimensões.

Outro dado importante a referir é que a pressão média considerada para cálculo da condutância nas flanges foi a pressão mais baixa que se pretende atingir (pois não é possível determinar-se a pressão à entrada da bomba), o que significa que a perda de eficiência do sistema está a ser avaliada para o pior cenário possível.

Tendo isto em conta e sendo que o sistema se encontra montado em série, a condutância total das flanges é dada por

$$\frac{1}{C_{total}} = \sum_i \frac{1}{C_i} \quad (4.14)$$

tendo-se assim para o regime viscoso

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_{total}} &= \frac{1}{6968,6} + 2 \times \frac{1}{11444,2} + \frac{1}{2168,4} + 2 \times \frac{1}{18270,12} + \frac{1}{15768,99} + \frac{1}{6999,86} + \frac{1}{3227} \\ \Leftrightarrow C_{total} &\approx 711,71 \text{ (L/s)} \end{aligned} \quad (4.15)$$

#### 4.3.3 Determinação do tempo total de bombeamento

Na fase inicial de bombeamento, a bomba rotativa é responsável por levar a pressão da câmara desde a pressão atmosférica até 5 mbar. Tendo por base a equação 3.14 e assumindo uma velocidade constante de bombeamento de 350 m<sup>3</sup>/h (97,22 L/s), tem-se que a velocidade efetiva de bombeamento neste regime é de

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{711,71} + \frac{1}{97,22} \Leftrightarrow S_{eff} = 85,54 \text{ (L/s)} \quad (4.16)$$

Verifica-se assim que as condutâncias determinadas apresentam um impacto ligeiro na bomba rotativa, sendo que a mesma trabalha a cerca de 88% da sua velocidade máxima. Tendo-se determinado a velocidade efetiva da bomba rotativa e com recurso à equação 4.5 tem-se que o tempo necessário para atingir a pressão de 5 mbar é de

$$t = \frac{1,84}{307,944} \times \ln \frac{1013,15}{5} = 0,03 \text{ (h)} \approx 2 \text{ (min)} \quad (4.17)$$

Como se pode verificar, com a velocidade de bombeamento escolhida o sistema é bastante rápido em descer a pressão até 5 mbar, momento a partir do qual a água das rolhas começa a ser libertada e tem que ser evacuada. Accionando a bomba *roots* tem-se que a velocidade efetiva da mesma é de

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{711,71} + \frac{1}{527,78} \Leftrightarrow S_{eff-roots} = 303,05 \text{ (L/s)} \quad (4.18)$$

a qual, ao contrário da bomba rotativa, funciona apenas a cerca de 60% da sua velocidade máxima.

Assumindo que a câmara de vácuo é exposta a um acréscimo de  $6,82 \times 10^6$  L proveniente do vapor de água das rolhas de cortiça e a bomba *roots* deverá remover este volume e levar a pressão interna a 0,1 mbar, tem-se que o tempo necessário é de aproximadamente

$$t = \frac{6,82 \times 10^6}{303,05} = 22504,5 \text{ (s)} \approx 6 \text{ (h)} \quad (4.19)$$

Com este resultado verifica-se assim que o vapor de água condiciona largamente o tempo de bombeamento necessário para atingir a pressão necessária. Estes resultados foram calculados assumindo as duas bombas indicadas nas figuras 4.9 e 4.10 [40].



Figura 4.9: Bomba *Roots* marca Edwards modelo EH2600.



Figura 4.10: Bomba rotativa dois estágios marca Edwards modelo E2M275.

Na figura 4.11 podemos observar a velocidade da bomba *roots* quando em funcionamento conjunto com a bomba rotativa escolhida, a tracejado.

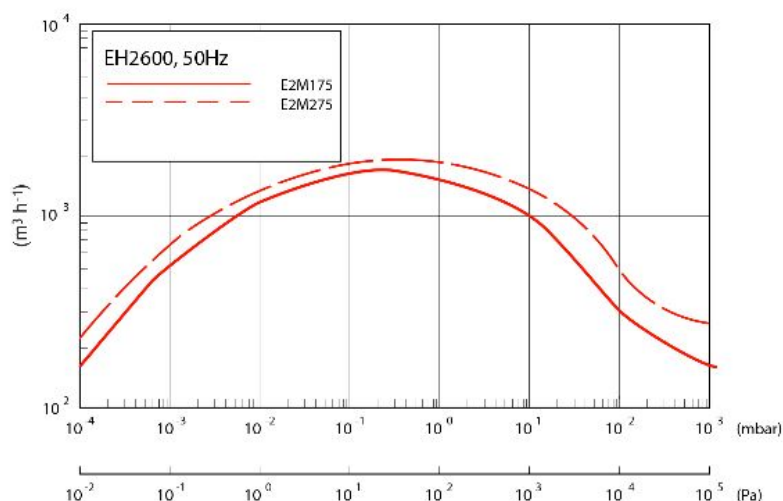


Figura 4.11: Velocidade da bomba *roots* em função da pressão [40].

Com base na figura 4.11 verifica-se que entre os 0,1 mbar e 5 mbar de atuação da bomba *roots*, a mesma apresenta velocidades próximas do seu pico máximo de funcionamento ( $\approx 1900 \text{ m}^3/\text{h}$ ), pelo que não se prevêem grandes erros de cálculo ao considerar esta velocidade constante durante a extração do vapor de água.

Tendo por base os resultados obtidos e por forma a diminuir-se o tempo de bombeamento

necessário à remoção do vapor de água da câmara, duas possíveis alterações podem ser realizadas:

- Substituir-se a bomba *roots* indicada pelo modelo EH4200, a qual apresenta uma velocidade de bombeamento de cerca de 3100 m<sup>3</sup>/h - mantendo-se as mesmas condições de operação é possível reduzir o tempo de extração em cerca de uma hora;
- Fazer-se uma alteração das flanges de ligação para flanges com um diâmetro maior, como por exemplo ISO-KF 160, por forma a maximizar a velocidade de bombeamento da bomba *roots* presente no sistema;

## 4.4 Sistema termodinâmico

O sistema termodinâmico, responsável pelo aquecimento das rolhas, encontra-se suspenso num suporte próprio dentro do tambor rotativo, como se mostra nas figuras 4.12 e 4.13

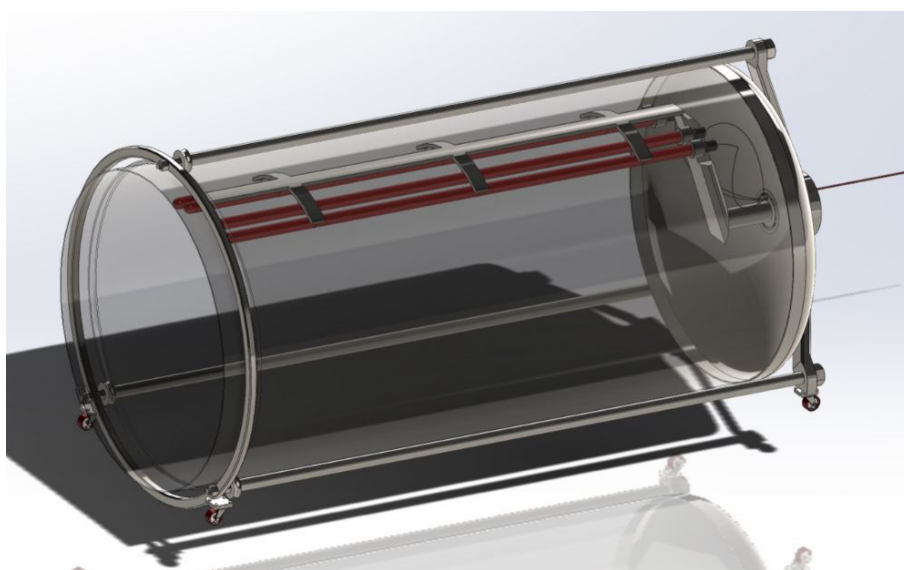


Figura 4.12: Vista isométrica do tambor rotativo com suporte e lâmpadas infravermelho - 1.



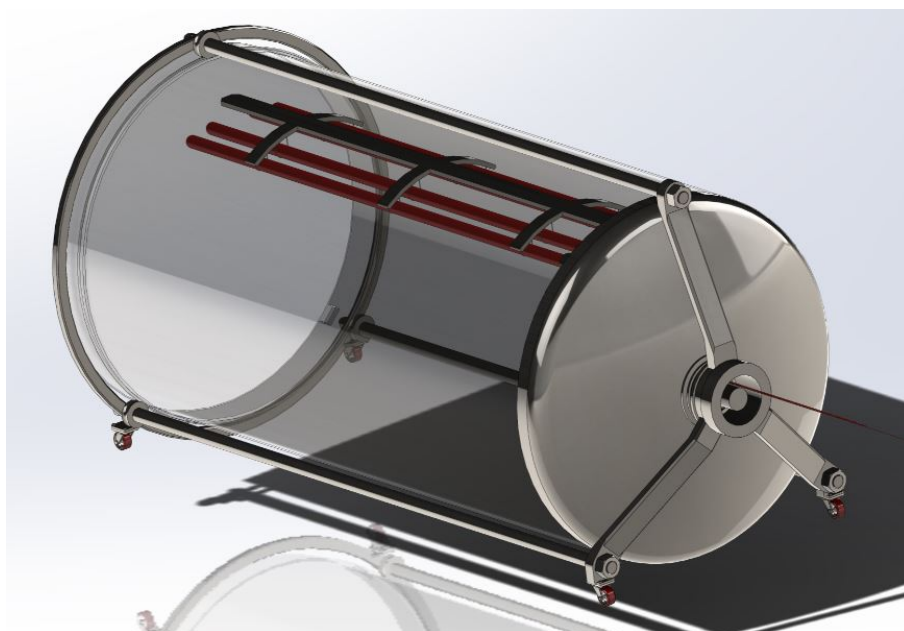


Figura 4.13: Vista isométrica do tambor rotativo com suporte e lâmpadas infravermelho - 2.

O suporte encontra-se fixo na sua extremidade à cabeça do tambor através de um rolamento de esferas e posteriormente à câmara externa, o que permite que este fique estático enquanto o tambor roda.

As resistências eléctricas das lâmpadas bem como o sensor de temperatura passam através do tambor e da câmara sendo posteriormente ligados ao controlador.

O tambor por sua vez encontra-se suspenso em três veios que acompanham o movimento do mesmo e conferem estabilidade de rotação. Por sua vez, as duas extremidades inferiores dos suportes têm rodas acopladas que permitem o movimento horizontal do tambor na câmara, facilitando o processo de carga e descarga das rolhas.

#### 4.4.1 Cálculo da potência necessária das lâmpadas infravermelho.

Dado que a quantidade de calor necessário para aquecer um material pode ser determinado pela sua capacidade térmica através da relação  $Q = m \times c \times \Delta T$  (J), com  $m$  a massa do material,  $c$  o calor específico e  $\Delta T$  a diferença de temperatura, tem-se que a potência necessária para aquecer um material num dado intervalo de tempo  $\Delta t$  é dada por

$$P = \frac{m \times c \times \Delta T}{\Delta t} \text{ (W)} \quad (4.20)$$

Assim, sendo que a cortiça apresenta um calor específico de 1800 J/(Kg.K) (tabela 3.1) e que a carga das 20000 rolhas é de cerca de 70 kg, considerando que se pretende apenas



despender 30 minutos no início do processo para subir a temperatura das rolhas até 180 °C, estima-se uma potência necessária de:

$$P = \frac{70 \times 1800 \times (453,15 - 293,15)}{30 \times 60} = 11200 \text{ (W)} \quad (4.21)$$

Assumindo esta potência como a potência radiativa emitida pelas lâmpadas infravermelho, de seguida calcula-se o fator geométrico e a transferência de calor entre as superfícies principais do conjunto, por forma a avaliar o impacto da potência calculada.

#### 4.4.2 Cálculo fator geométrico

A determinação do fator geométrico possibilita aferir a proporção de radiação que sai das lâmpadas e atinge as rolhas de cortiça e depreende a posição relativa de ambas as superfícies.

Considerando que a área de exposição das lâmpadas bem como a superfície exposta das rolhas podem ser aproximadas a uma geometria de planos rectangulares separados de uma distância  $H = 300 \text{ mm}$ , ambos de comprimento  $W_1 = 1500 \text{ mm}$  e largura  $W_2 = 800 \text{ mm}$ , como se mostra na figura 4.14, tem-se que  $x = \frac{W_1}{H} = 5$  e  $y = \frac{W_2}{H} = 2,6$ .

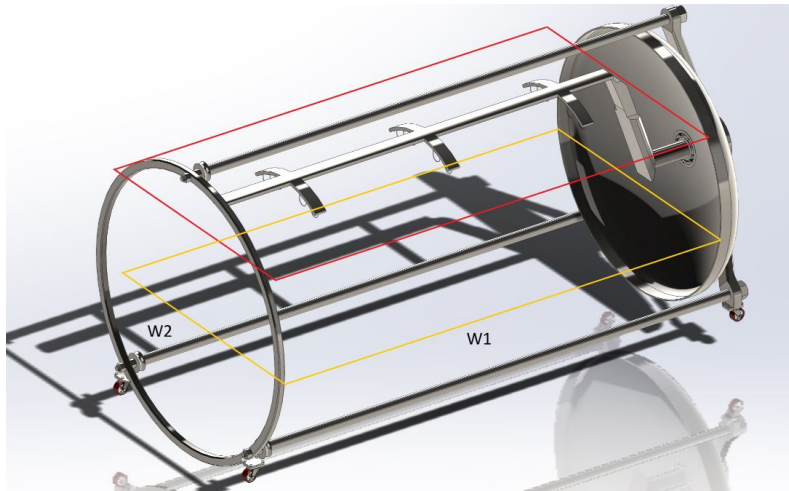


Figura 4.14: Planos paralelos considerados para cálculo do fator geométrico.

Recorrendo à figura 3.9 verifica-se que, para as dimensões de  $x$  e  $y$  calculadas, o fator geométrico entre a superfície das lâmpadas e rolhas é de 0,6.

Assumindo que o conjunto de lâmpadas, as rolhas e o tambor formam um espaço fechado e que a soma do fator geométrico de uma superfície com as restantes superfícies, inclusive a própria superfície, é igual a 1, tem-se que

$$\begin{aligned} F_{\text{lâmpadas} \rightarrow \text{lâmpadas}} + F_{\text{lâmpadas} \rightarrow \text{rolhas}} + F_{\text{lâmpadas} \rightarrow \text{tambor}} &= 1 \\ 0 + 0,6 + F_{\text{lâmpadas} \rightarrow \text{tambor}} &= 1 \Leftrightarrow F_{\text{lâmpadas} \rightarrow \text{tambor}} = 0,4 \end{aligned} \quad (4.22)$$

com  $F$  o fator geométrico entre as superfícies consideradas. Note-se que  $F_{lâmpadas \rightarrow lâmpadas}$  foi considerado zero pois uma geometria plana nunca se vê a si própria.

#### 4.4.3 Cálculos de transferência de calor

Sendo que já foi determinada a potência para aquecer o conjunto de rolhas e o fator geométrico entre as superfícies do espaço fechado (lâmpadas, tambor e rolhas), está-se assim em condições de avaliar o impacto desta potência nos elementos principais do sistema. Para tal, e como referido no sub capítulo 3.2.4.4, este cálculo tem por recurso uma analogia a um circuito elétrico, como se mostra na figura 4.15.

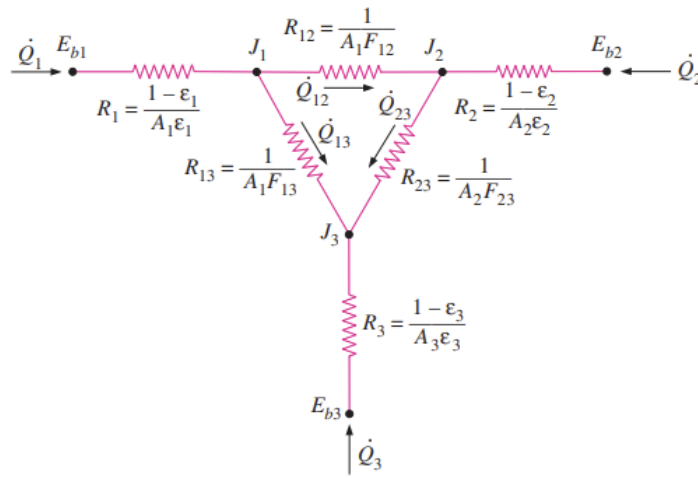


Figura 4.15: Esquemático elétrico representativo da transferência de calor entre três superfícies num espaço fechado [27].

Tendo por base o esquemático representado e que a soma das correntes (transferência de energia radiante líquida) num nó do circuito é zero, as três equações necessárias para determinar a radiância em cada superfície são:

$$\begin{aligned} \frac{E_{b1} - J_1}{R_1} + \frac{J_2 - J_1}{R_{12}} + \frac{J_3 - J_1}{R_{13}} &= 0 \\ \frac{J_1 - J_2}{R_{12}} + \frac{E_{b2} - J_2}{R_2} + \frac{J_3 - J_2}{R_{23}} &= 0 \\ \frac{J_1 - J_3}{R_{13}} + \frac{J_2 - J_3}{R_{23}} + \frac{E_{b3} - J_3}{R_3} &= 0 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Nas equações acima definidas assume-se que os índices 1, 2 e 3 dizem respeito à fonte emissora (lâmpadas), rolhas e tambor, respetivamente.

Sendo as áreas de exposição da fonte e rolhas de  $1,2 \text{ m}^2$ , do tambor de  $4 \text{ m}^2$  e as emissividades 0,85, 0,7 e 0,5 respetivamente, os valores das resistências das superfícies e do espaço entre as mesmas são:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{1 - 0,85}{1,2 \times 0,85} = 0,147 \\
 R_2 &= \frac{1 - 0,7}{1,2 \times 0,7} = 0,357 \\
 R_3 &= \frac{1 - 0,5}{4 \times 0,5} = 0,25
 \end{aligned}
 \tag{4.24}$$

$$\begin{aligned}
 R_{12} &= \frac{1}{1,2 \times 0,6} = 1,389 \\
 R_{23} &= \frac{1}{1,2 \times 0,4} = 2,083 \\
 R_{13} &= \frac{1}{1,2 \times 0,4} = 2,083
 \end{aligned}$$

Por sua vez, assumindo a potência calculada para a fonte e que as rolhas e o tambor se encontram num estado inicial a 20 °C, a energia radiada por estas superfícies é de:

$$\begin{aligned}
 E_{b1} &= \frac{11200}{1,2} = 9333,33 \text{ (W/m}^2\text{)} \\
 E_{b2} = E_{b3} &= \sigma T^4 = 5,67 \times 10^{-8} \times (273,15 + 20)^4 = 418,7 \text{ (W/m}^2\text{)}
 \end{aligned}
 \tag{4.25}$$

Substituindo as variáveis determinadas obtém-se assim três equações a três incógnitas:

$$\begin{aligned}
 \frac{9333,33 - J_1}{0,147} + \frac{J_2 - J_1}{1,389} + \frac{J_3 - J_1}{2,083} &= 0 \\
 \frac{J_1 - J_2}{1,389} + \frac{418,7 - J_2}{0,357} + \frac{J_3 - J_2}{2,083} &= 0 \\
 \frac{J_1 - J_3}{2,083} + \frac{J_2 - J_3}{2,083} + \frac{418,7 - J_3}{0,25} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{4.26}$$

obtendo-se os valores de radiância

$$\begin{aligned}
 J_1 &\approx 8185,82 \text{ (W/m}^2\text{)} \\
 J_2 &\approx 1923,95 \text{ (W/m}^2\text{)} \\
 J_3 &\approx 1316,14 \text{ (W/m}^2\text{)}
 \end{aligned}
 \tag{4.27}$$

Sabendo os valores das radiâncias das três superfícies é então possível calcular-se a transferência de energia radiante líquida em cada uma das superfícies:

$$\begin{aligned}
\dot{Q}_1 &= \frac{J_1 - J_2}{R_{12}} + \frac{J_1 - J_3}{R_{13}} \Leftrightarrow \\
\dot{Q}_1 &= \frac{8185,82 - 1923,95}{1,389} + \frac{8185,82 - 1316,14}{2,083} = 7806,16 \text{ (W)} \\
\\
\dot{Q}_2 &= \frac{J_2 - J_1}{R_{12}} + \frac{J_2 - J_3}{R_{23}} \Leftrightarrow \\
\dot{Q}_2 &= \frac{1923,95 - 8185,82}{1,389} + \frac{1923,95 - 1316,14}{2,083} = -4216,39 \text{ (W)} \\
\\
\dot{Q}_3 &= \frac{J_3 - J_1}{R_{13}} + \frac{J_3 - J_2}{R_{23}} \Leftrightarrow \\
\dot{Q}_3 &= \frac{1316,14 - 8185,82}{2,083} + \frac{1316,14 - 1923,95}{2,083} = -3589,8 \text{ (W)}
\end{aligned} \tag{4.28}$$

Por observação dos valores calculados, verifica-se que nas condições iniciais de irradiação as rolhas apresentam um ganho energético de 4216,39 W, sendo que os restantes 3589,8 W incidem no tambor promovendo o seu aquecimento.

Porque o ganho energético das superfícies diminui em função do aumento da sua temperatura ao longo do tempo e o cálculo da cinética de aquecimento (e perdas de calor) de todas as superfícies em simultâneo é algo complexo, recorreu-se a um cálculo numérico iterativo que permitisse avaliar a subida da temperatura das rolhas e tambor considerando o sistema isolado, de acordo com a figura 4.15.

Assim, em intervalos de 200 segundos determinou-se a potência líquida recebida por ambas as superfícies ( $\dot{Q}_2$  e  $\dot{Q}_3$ ) e temperaturas respetivas tendo como referência as suas temperaturas no intervalo anterior, calculadas a partir da relação da capacidade térmica. As perdas de calor do tambor para a câmara foram posteriormente determinadas através da relação

$$\dot{Q}_{34} = \frac{A_3 \sigma (T_3^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\epsilon_3} + \frac{1 - \epsilon_4}{\epsilon_3} \times \left(\frac{r_3}{r_4}\right)} \text{ (W)} \tag{4.29}$$

considerando que o tambor e a câmara podem ser aproximados a dois cilindros concêntricos de comprimento infinito, sendo que  $A_3$ ,  $\epsilon_3$ ,  $T_3$  e  $r_3$  correspondem à área, emissividade, temperatura e raio do tambor, respetivamente, e  $T_4$  e  $r_4$  à temperatura e raio da câmara [27].

As perdas da câmara para o exterior, por sua vez, foram determinadas com recurso à relação

$$\dot{Q}_{45} = A_4 \sigma \epsilon_4 (T_4^4 - T_5^4) \text{ (W)} \tag{4.30}$$

onde se assumiu que a dimensão da câmara é desprezável relativamente à área exterior, sendo que  $A_4$ ,  $\epsilon_4$  e  $T_4$  correspondem à área, emissividade e temperatura da câmara e  $T_5$  a temperatura ambiente constante de 293,15 K [27].

Após computação dos dados, obtiveram-se as figuras 4.16, onde é possível visualizar a evolução da temperatura do conjunto considerando a potência constante, e a figura 4.17 que representa as perdas do sistema, respetivamente.

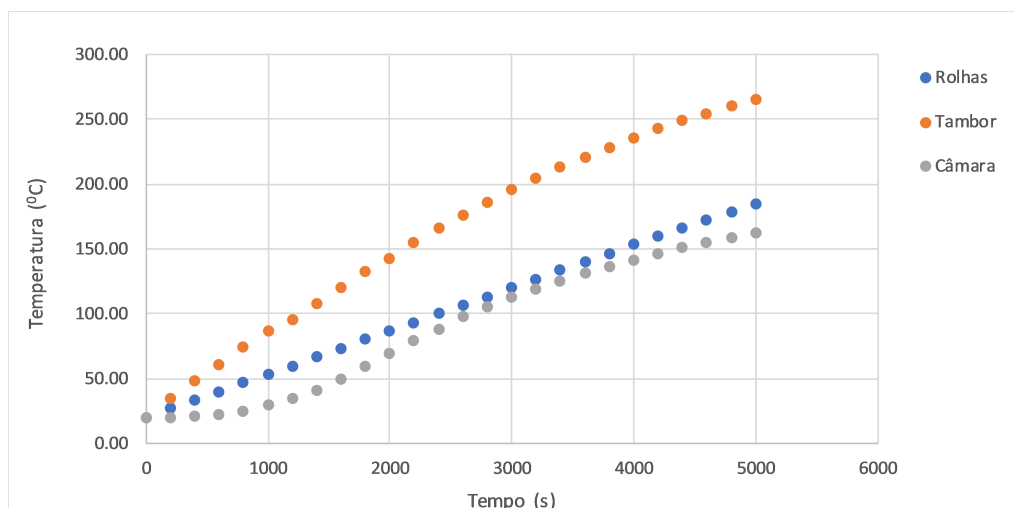


Figura 4.16: Evolução da temperatura das rolhas, tambor e câmara.

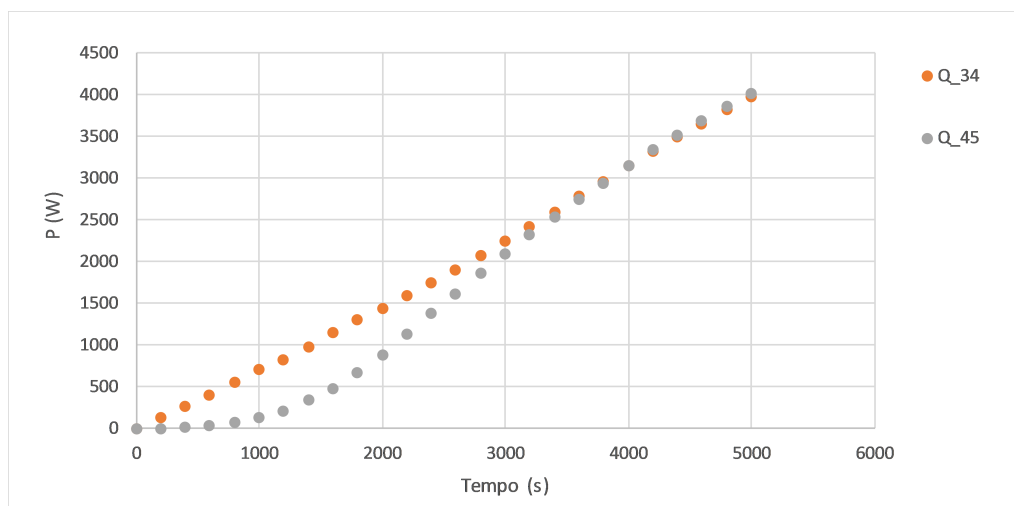


Figura 4.17: Evolução das perdas do sistema.

Por observação do gráfico 4.16 representado verifica-se que as rolhas apenas atingem uma temperatura próxima de 180 °C ao fim de 5000 segundos (01 h : 23 min), sendo que findo este tempo, o tambor atinge 270 °C e a câmara uma temperatura de 162 °C, temperaturas estas bastante elevadas.

Por consequência, e por análise do gráfico 4.17, é possível verificar-se que as perdas de

calor do sistema são consideravelmente elevadas apresentando na sua totalidade um valor próximo de 8000 W, pelo que, após se atingir o tempo necessário de aquecimento das rolhas, a potência das lâmpadas deverá convergir para este valor funcionando num regime ON-OFF através do controlador PID por forma a manter uma temperatura constante nas rolhas de cortiça.

Note-se que este cálculo não contabilizou perdas de calor por condução e convecção, as quais poderão ter um impacto significativo no sistema.

No entanto, e tendo por base os resultados obtidos, é razoável assumir-se que a eficiência do sistema pode ser consideravelmente melhorada por aplicação de um escudo de baixa emissividade entre o tambor e a câmara ou por aproximação das lâmpadas à superfície das rolhas, aumentando consequentemente o seu fator geométrico e diminuindo o tempo de aquecimento necessário.

## 4.5 Sistema de rotação

O sistema de rotação tem como objetivo promover a movimentação axial do tambor de tal forma que a radiação proveniente das lâmpadas infravermelho tenha contacto direto com o maior número de rolhas possível.

Tal como se mostra na figuras 4.18, este sistema é constituído por um motor elétrico acoplado a um redutor e um conjunto de rodas-dentadas que desmultiplicam a velocidade inicial do motor nas 10 rpm desejadas.

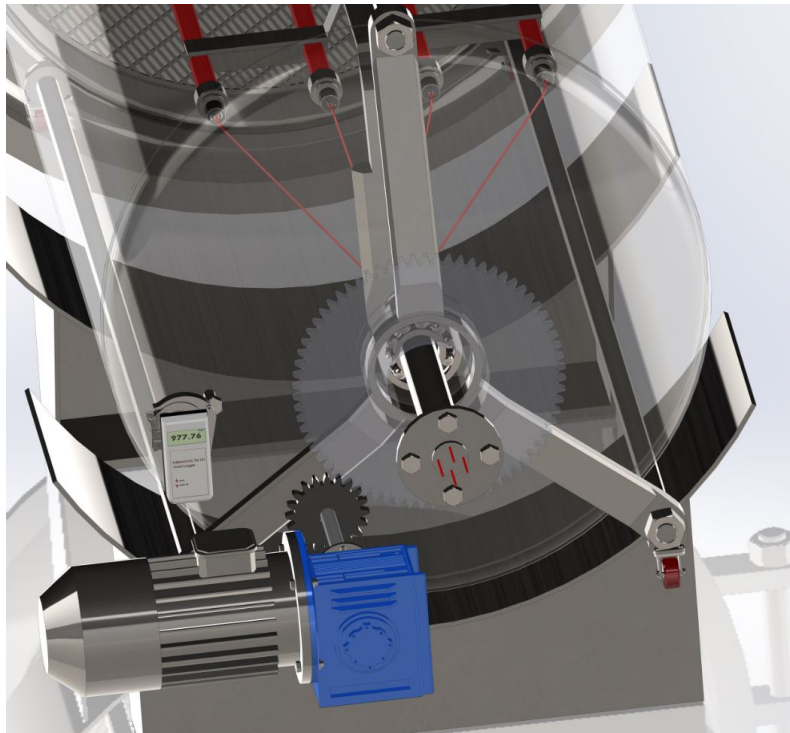


Figura 4.18: *Close-up* sistema rotação.

Na configuração acima representada assume-se que o conjunto motor+reductor apresenta uma rotação de saída de 35 rpm pelo que, tendo por base a equação da relação de transmissão 3.28 tem-se que:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{d_{01}}{d_{02}} \Leftrightarrow \frac{35}{10} = \frac{d_{01}}{d_{02}} \Leftrightarrow d_{01} = 3,5 \times d_{02} \quad (4.31)$$

Assim, admitindo que o carroto apresenta 100 mm de circunferência primitiva e 20 dentes, para garantir uma velocidade final transmitida ao tambor de 10 rpm a roda deverá ter 350 mm de circunferência primitiva e 70 dentes.

O módulo por sua vez, igual na roda e no carroto é dado pela divisão do diâmetro da circunferência primitiva pelo número de dentes:

$$m = \frac{d_0}{z_0} = \frac{350}{70} = \frac{100}{20} = 5 \quad (4.32)$$

Outras dimensões relevantes no dimensionamento de engrenagens são a sua espessura, a altura da cabeça e pé e diâmetros respectivos. Apesar de terem sido utilizadas engrenagens da *Toolbox* do *SolidWorks* que respeitassem o número de dentes e módulo, a espessura e altura das engrenagens são de seguida determinadas. A espessura de uma roda dentada é geralmente definida por

$$e = 0.5 \times t \quad (4.33)$$

sendo  $t$  o passo da engrenagem, o qual é dado por  $\pi \times m$ . Sabendo o módulo das engrenagens, determina-se assim que a sua espessura é de aproximadamente 15,7 mm. Por sua vez, a altura da cabeça é igual a  $m$  e a altura do pé é dada por  $\frac{7}{6} \times m$  tendo então os valores de 5 mm e 5,83 mm, respetivamente.

Relativamente aos diâmetros das circunferências tem-se que o diâmetro do pé é dado por  $d_p \approx d_0 - 2,334 \times m$  e o da cabeça dado por  $d_c = d_0 + 2 \times m$ , tendo então os valores de 88,33 mm e 100 mm para o carroto e 338,33 mm e 360 mm para a roda, respetivamente.

Por fim, e tendo por base a relação 3.31, tem-se que a distância dos centros das engrenagens é dada por:

$$L = \frac{d_{01} + d_{02}}{2} = \frac{350 + 100}{2} = 225 \text{ (mm)} \quad (4.34)$$

Assumindo que o tipo de material das engrenagens é do mesmo tipo de material que a câmara e tambor - AISI 304L - e sabendo as suas dimensões calcula-se de seguida os seus momentos de inércia com base nas equações 3.24 (os valores de massa dos componentes foram retirados diretamente do *SolidWorks*).

Assim, para a roda tem-se que

$$I_{roda} = \frac{1}{8} \times 8,24 \times 0,1225 \times \left(\frac{20}{70}\right)^2 = 0,0103 \text{ (Kg m}^2\text{)} \quad (4.35)$$

e para o carroto:

$$I_{carreto} = \frac{1}{8} \times 0,7 \times 0,1^2 = 8,75 \times 10^{-4} \text{ (Kg m}^2\text{)} \quad (4.36)$$

O momento de inércia do tambor, aproximado a um cilindro oco é dado por

$$I_{tambor} = \frac{1}{4} \times 126,807 \times 0,8^2 \times \left(\frac{20}{70}\right)^2 = 1,656 \text{ (Kg m}^2\text{)} \quad (4.37)$$



e do veio de transmissão que faz a ligação ao carrreto

$$I_{veiotransmissao} = \frac{1}{8} \times 0,846 \times 0,02^2 = 4,23 \times 10^{-5} \text{ (Kg m}^2\text{)} \quad (4.38)$$

Admitindo que é pretendido que o tambor atinja a velocidade final de 10 rpm em 2 segundos, tem-se que o torque de aceleração é dado por

$$T_a = (1,656 + 0,0103 + 8,75 \times 10^{-4} + 4,23 \times 10^{-5}) \times \frac{2 \times \pi \times 10}{60} \times \frac{1}{2} = 0,87 \text{ (Nm)} \quad (4.39)$$

O torque passivo por sua vez, assumindo um coeficiente de fricção de 0,8 é dado por

$$T_L = \frac{0,8 \times 126,8 \times 0,8}{2} = 40,6 \text{ (Nm)} \quad (4.40)$$

Assumindo um factor de segurança de 2 então o torque do motor necessário para rodar o tambor é dado por

$$T_M = 2 \times (0,87 + 40,6) = 82,94 \text{ (Nm)} \quad (4.41)$$

e a potência do motor necessária de

$$P_M = T \times \omega = 82,94 \times \frac{2\pi \times 10}{60} \approx 87 \text{ (W)} \quad (4.42)$$

Sabendo o torque aproximado do motor necessário para rodar todos os componentes e, através da análise de curvas de velocidade-torque de vários fornecedores, um possível exemplo de motor a aplicar no sistema pode ser o motor que se mostra na figura 4.19.



Figura 4.19: Moto-reductor marca Groschopp modelo 76269 [41].

O modelo em questão consiste num modelo AC trifásico de 230 V 60 Hz de 4 pólos e velocidade nominal de 1610 rpm. O redutor apresenta uma relação de transmissão de 50:1 sendo que o conjunto apresenta uma velocidade nominal de 32,5 rpm, binário de 28,32 N.m e uma potência de 97 W.

Na figura 4.20 podemos observar a curva velocidade-torque do motor em questão:

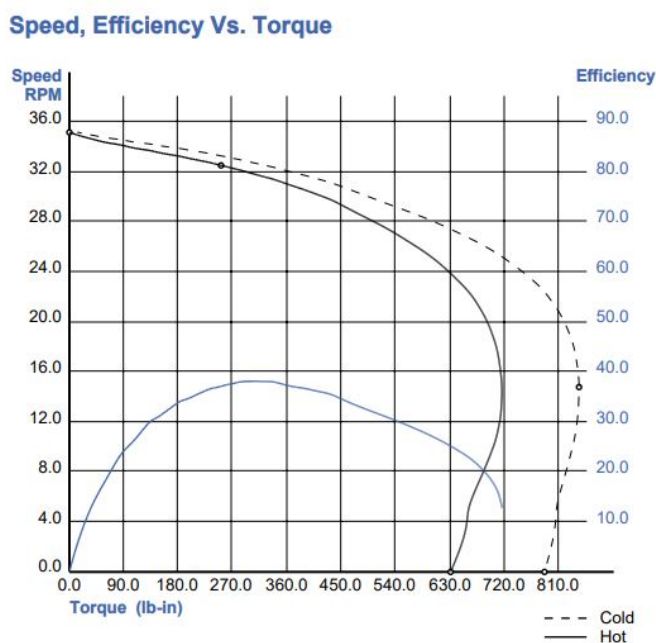


Figura 4.20: Curva velocidade-torque do modelo 76269 [42].

Por análise da curva verifica-se que o torque máximo do motor-redutor é de cerca de 842,59 lb-in ( $\approx 95,2$  N.m) pelo qual este tem a capacidade suficiente de rodar o conjunto à velocidade pretendida bem como superar o torque inicial necessário, assumindo os pressupostos feitos no seu dimensionamento.

## SIMULAÇÃO DE PRESSÃO, TEMPERATURA E MONTAGEM FINAL

Para além da construção e desenho de equipamentos, o *SolidWorks* permite obter uma interpretação visual de determinados fatores externos e de como estes afetam a estabilidade e integridade dos equipamentos desenhados. Assim, tendo por base esta funcionalidade de simulação, o impacto da pressão externa determinada bem como uma análise térmica são de seguida demonstrados.

### 5.1 Impacto pressão externa

Para avaliação da integridade da câmara foi realizada uma simulação com base no critério de falha de von Mises.

De entre vários critérios de falha para materiais dúcteis - materiais que suportam grandes deformações antes de quebrarem, tais como o metal - o critério de von Mises é o mais utilizado atualmente e que, com base no cálculo das tensões nominais e de cisalhamento aplicadas a um material, retorna um valor denominado de tensão equivalente de von Mises. Nos pressupostos deste critério, se a tensão equivalente num ponto do material for superior à sua tensão de limite elástico, limite este a partir do qual o material começa a sofrer deformação plástica e não volta às suas características iniciais, então o material falha nesse ponto.

Com base nas referências das tabelas 3.3 e 3.4 o material do tipo aço inox 304L foi incluído na base de dados:

## CAPÍTULO 5. SIMULAÇÃO DE PRESSÃO, TEMPERATURA E MONTAGEM FINAL

Property	Value	Units
Elastic Modulus	193000	N/mm <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.29	N/A
Shear Modulus	75000	N/mm <sup>2</sup>
Mass Density	7900	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	485	N/mm <sup>2</sup>
Compressive Strength		N/mm <sup>2</sup>
Yield Strength	170	N/mm <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	1.8e-05	/K
Thermal Conductivity	16.3	W/(m·K)
Specific Heat	500	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

Figura 5.1: Características aço Inox 304L colocadas no *SolidWorks* para simulação.

Após introdução das características do material procedeu-se à simulação da câmara. Para tal especificou-se uma pressão externa aplicada de 1,5 bar (superior ao efetivamente necessário), os pontos de suporte da câmara nos apoios da mesma (a verde na figura 5.2) e a criação de uma malha. A necessidade da malha prende-se pelo facto deste tipo de simulações recorrer ao método de elementos finitos (em inglês FEM), método este no qual um problema inicialmente complexo é reduzido em múltiplos pequenos problemas através da criação de vários elementos (de geometria variável) ligados por nós. Quanto menores forem estes elementos e nós (e em maior quantidade), maior a precisão nos resultados finais - à custa de tempo e poder computacional. Na figura 5.2 podemos observar a malha criada e os pontos de pressão selecionados e na figura 5.3 o resultado do teste de von Mises.

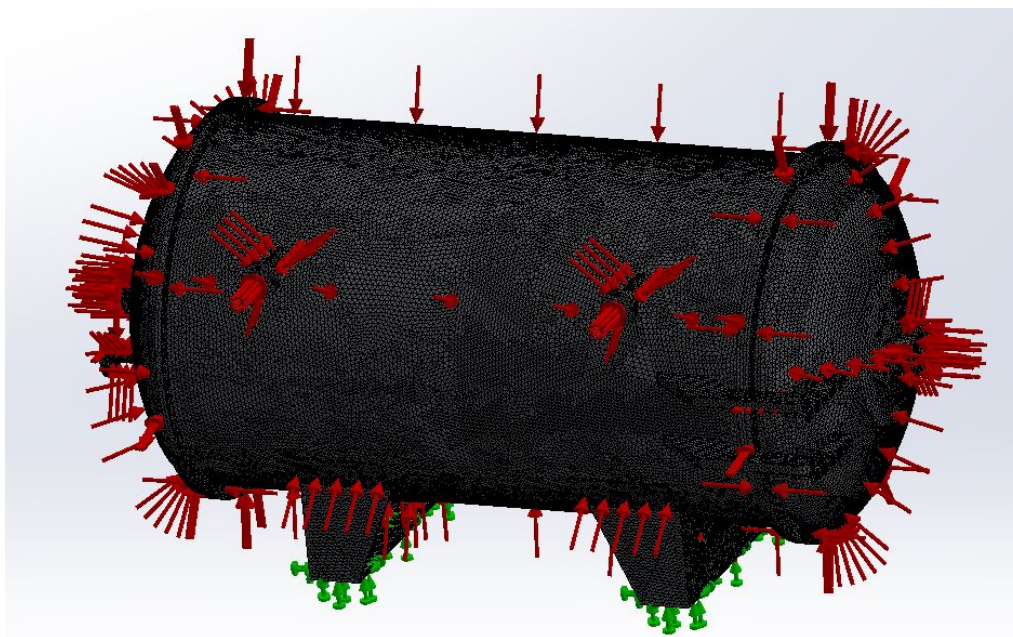


Figura 5.2: Malha e pontos de pressão aplicados na câmara.

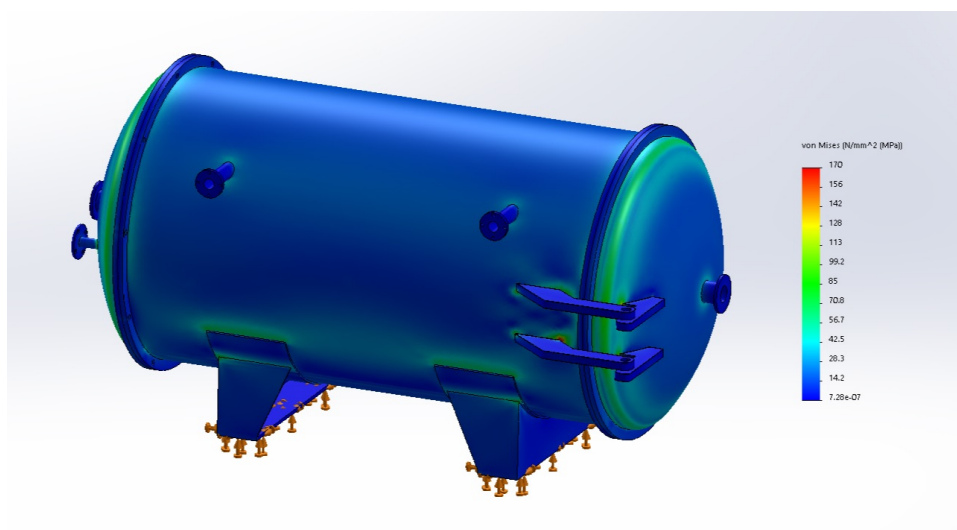


Figura 5.3: Distribuição da tensão equivalente de von Mises na câmara de pressão.

Por análise da figura 5.3 verifica-se que de uma forma geral a distribuição de tensões aplicadas não supera a tensão de elasticidade do material (*yield strength* na tabela 5.1), sendo que a média de tensões aplicadas é de cerca de 20 MPa. Existem, no entanto, nas dobradiças da porta, tensões que ultrapassam em larga escala as tensões admissíveis (cerca de 300 MPa), pelo qual esta tem que ser reforçada, tanto na câmara como na porta, como se mostra na figura 5.4. Uma das razões para a qual isto acontece deve-se ao facto das dobradiças terem sido desenhadas sem referência de norma.

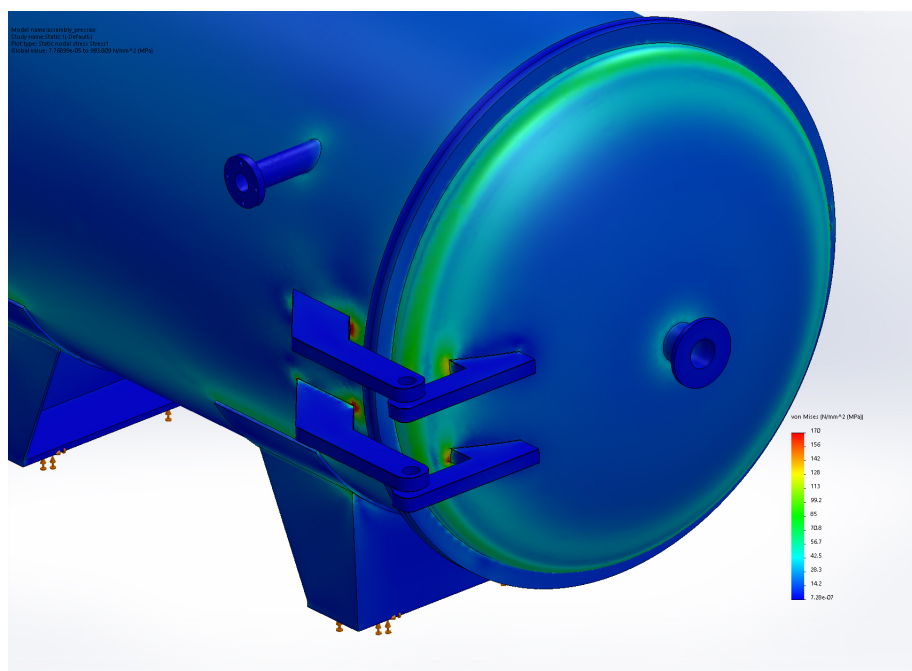


Figura 5.4: Pontos de falha nas dobradiças do equipamento.

Após inclusão de material na câmara e atenuação das arestas na porta foi possível reduzir as tensões aplicadas.

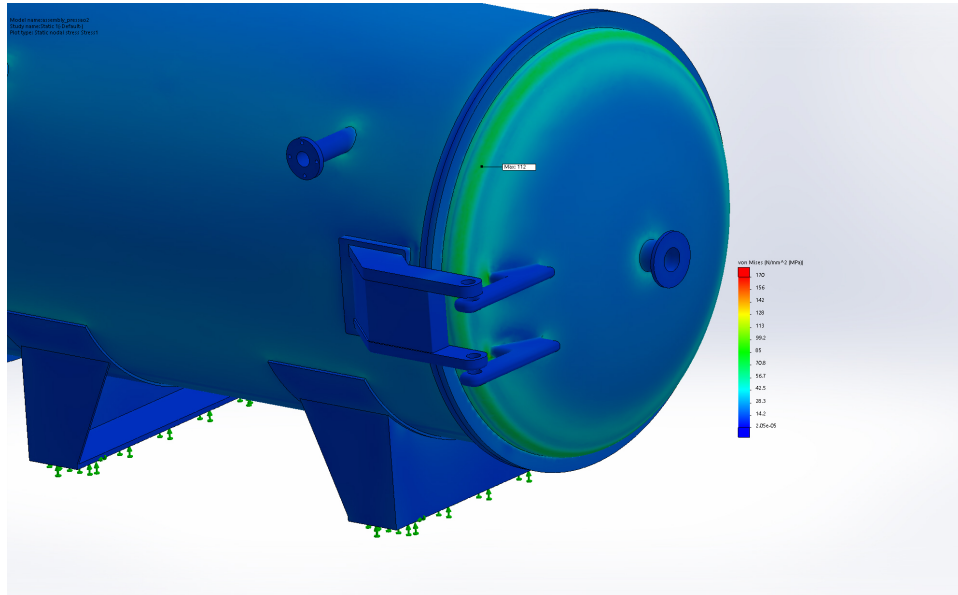


Figura 5.5: Correção das tensões aplicadas na dobradiça por inclusão de material e atenuação de arestas.

## 5.2 Velocidade de aquecimento

Por forma a complementar o estudo teórico realizado da cinética de aquecimento do sistema demonstrado no capítulo anterior, de seguida mostra-se também uma simulação térmica temporal realizada com recurso ao *SolidWorks*. Desta forma, foi criada uma massa representativa do conjunto das rolhas dentro do tambor rotativo e cada lâmpada apresenta uma potência constante de 2800 W. A emissividade das lâmpadas foi definida a 0,85, das rolhas a 0,7 e do tambor e câmara a 0,5.

A temperatura inicial de todo o conjunto foi definida a 20 °C e o sistema foi considerado fechado, ou seja, apenas a superfície externa da câmara emite radiação para o exterior. A distância entre as lâmpadas infravermelho e a superfície do conjunto de rolhas é de cerca 300 mm e a distância entre as lâmpadas no suporte é de 150 mm.

Na figura 5.6 podemos observar a montagem descrita e uma representação visual da temperatura nas diferentes superfícies, com indicação dos nós/elementos selecionados para avaliação da cinética de aquecimento. Note-se que, porque a simulação é estática e não existe rotação de massa, os pontos selecionados para avaliação da temperatura do tambor e câmara encontram-se na lateral destas superfícies pois são melhor representativas de uma temperatura média. Para as rolhas, e seguindo o mesmo racional, foram escolhidos pontos imediatamente abaixo da superfície exposta a radiação.



Na figura 5.7 podemos observar a evolução da temperatura ao longo do tempo dos elementos selecionados e nos gráficos 5.8, 5.9 e 5.10 uma comparação dos resultados obtidos com o determinado teoricamente.

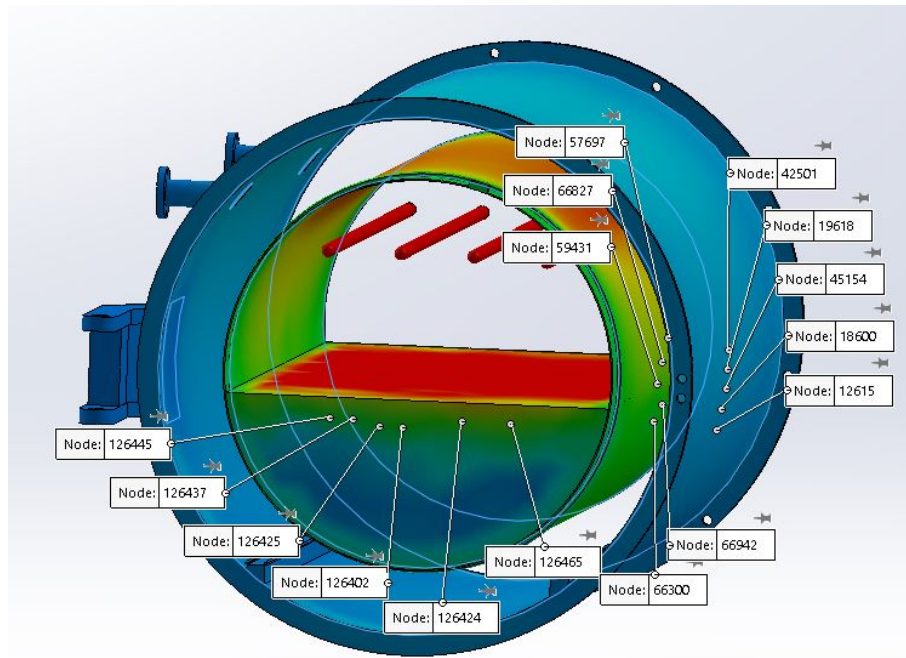


Figura 5.6: Montagem do conjunto descrito para avaliação térmica.

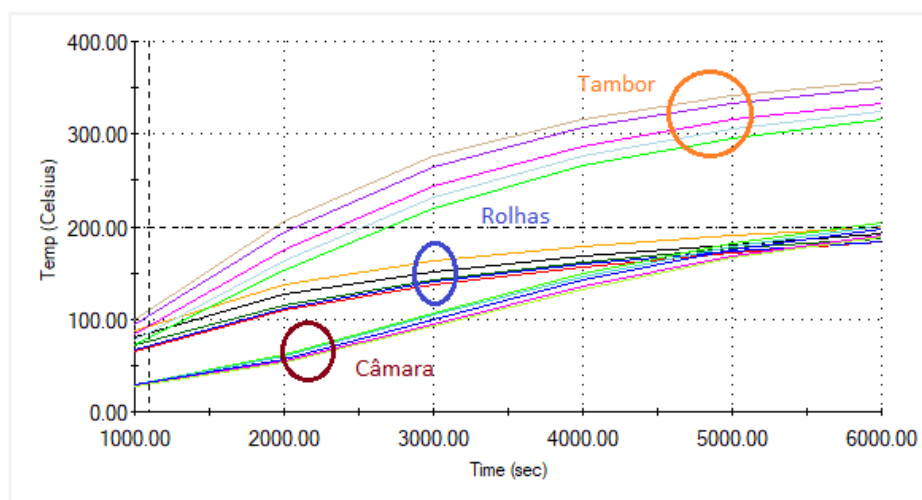


Figura 5.7: Evolução da temperatura do conjunto determinada por simulação.

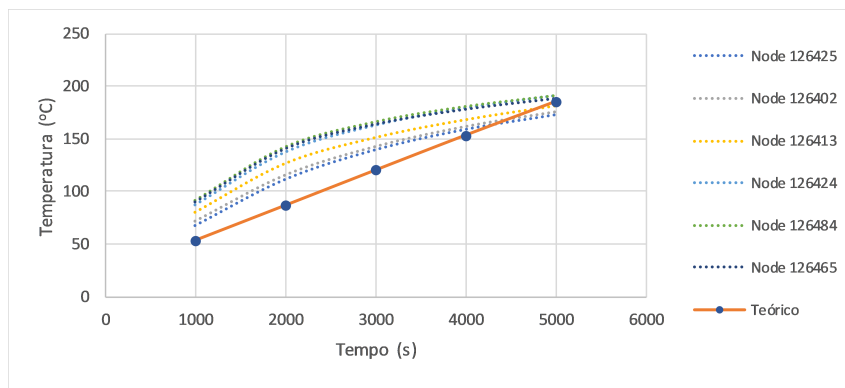


Figura 5.8: Evolução da temperatura das rolhas - simulação *vs* teórico.

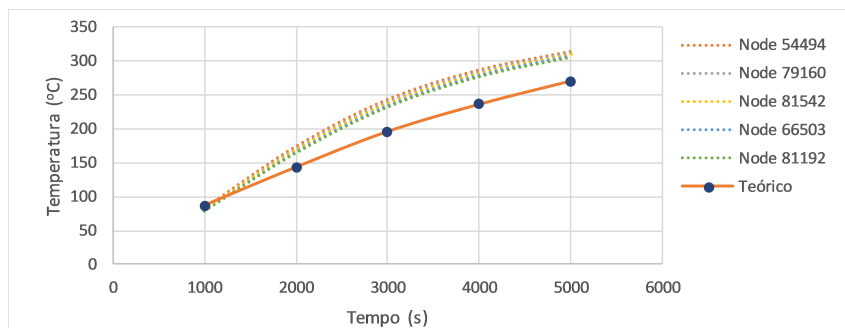


Figura 5.9: Evolução da temperatura do tambor - simulação *vs* teórico.

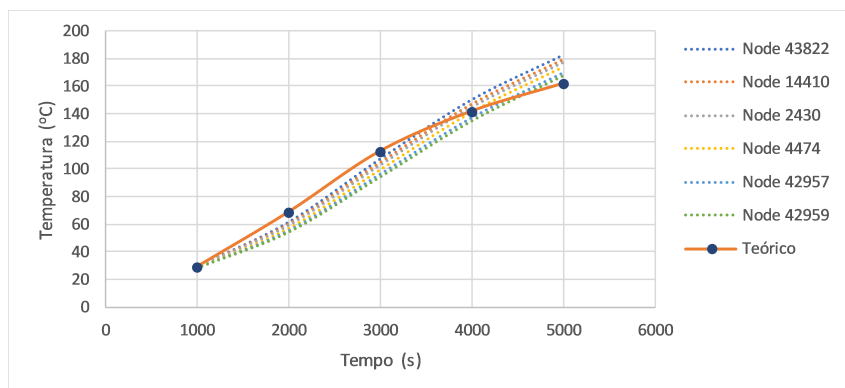


Figura 5.10: Evolução da temperatura da câmara - simulação *vs* teórico.

Por observação dos gráficos acima representados verifica-se que a temperatura das rolhas, tanto no modelo teórico como na simulação, convergem para uma temperatura próxima dos 180 °C ao fim de 5000 segundos. No entanto, enquanto que teoricamente se determinou uma subida linear de temperatura, a simulação apresenta uma curva logarítmica mais representativa da realidade.

Por outro lado, relativamente ao tambor, ainda que o cálculo teórico determine uma curva de evolução semelhante à simulação, verifica-se uma diferença de cerca de 35 °C ao fim de 5000 segundos, sendo que a simulação regista uma temperatura próxima dos 305 °C



enquanto que teoricamente se previu uma subida até cerca 270 °C.

Por fim, a câmara apresenta um comportamento similar entre o determinado teoricamente e verificado por simulação. Ambos os modelos convergem ao fim de 5000 segundos para temperaturas próximas entre si com a simulação a registar temperaturas em média 10 °C superiores, existindo no entanto um ligeiro desfasamento temporal entre a simulação e o determinado teoricamente.

Sendo que se verificou uma certa proximidade entre os resultados obtidos teoricamente com a simulação térmica, foi também realizada uma modulação temporal da potência das lâmpadas por forma a manter a temperatura das rolhas constante ao longo do tempo. Na figura 5.11 pode-se observar a modulação alcançada para obter o resultado desejado e na figura 5.12 a evolução da temperatura ao fim de 10000 segundos (02 h : 42 min).

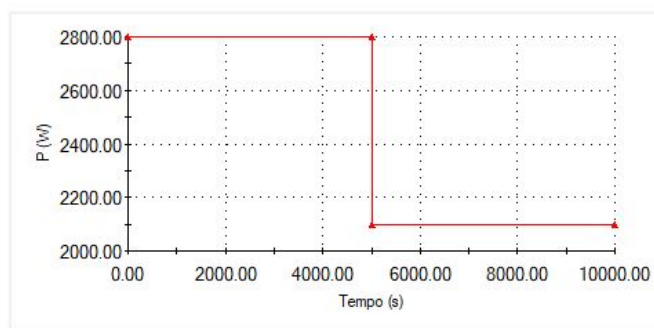


Figura 5.11: Modulação temporal da potência das lâmpadas IV.

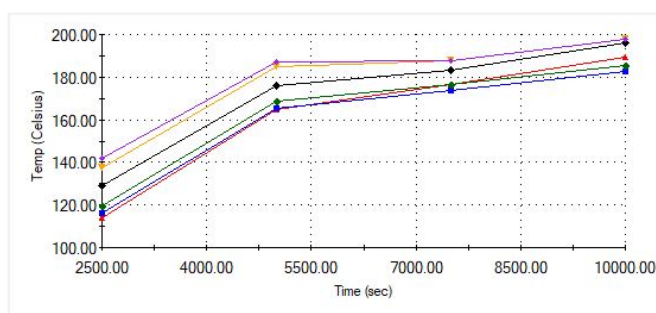


Figura 5.12: Evolução temporal da temperatura das rolhas após retificação da potência das lâmpadas IV.

Verifica-se assim que com a aplicação de um controlo de potência nas lâmpadas infravermelho foi possível manter a temperatura das rolhas a uma temperatura constante de 180 °C até cerca de 7500 segundos (02 h : 05 min) sendo que para tal, foi necessário realizar um decréscimo da potência total das lâmpadas de 11200 W para 8400 W ao fim de 5000 segundos. Findo este tempo e tendo por base os resultados obtidos, é razoável assumir-se que nos instantes seguintes o sistema está a compensar as perdas de calor por radiação.

É no entanto importante referir que apesar de se conseguir prever a evolução da temperatura das rolhas num contexto de simulação, o tempo final necessário para uniformizar todas as rolhas dentro da câmara só é possível determinar experimentalmente.

### 5.3 Montagem final

De seguida apresenta-se imagens do conjunto final.

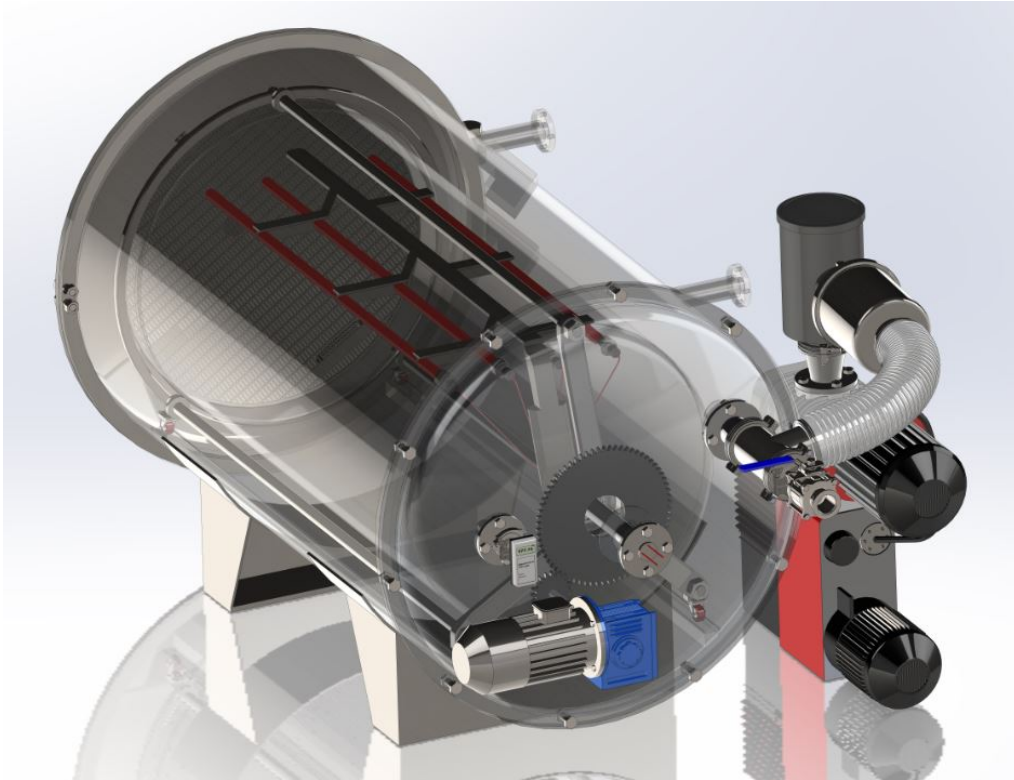


Figura 5.13: Montagem - 1.

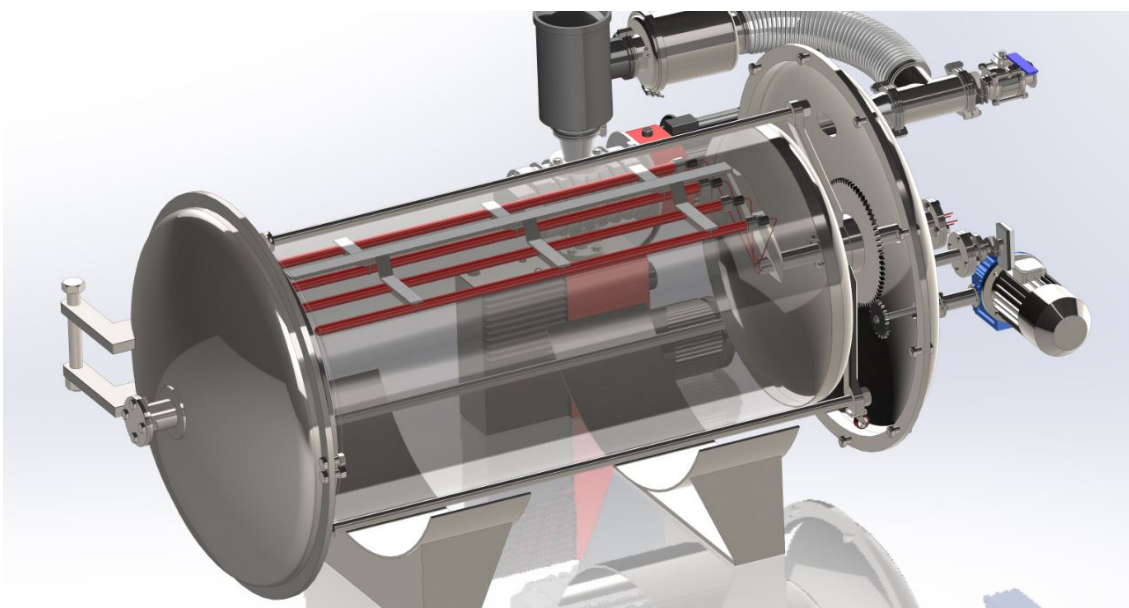


Figura 5.14: Montagem - 2.

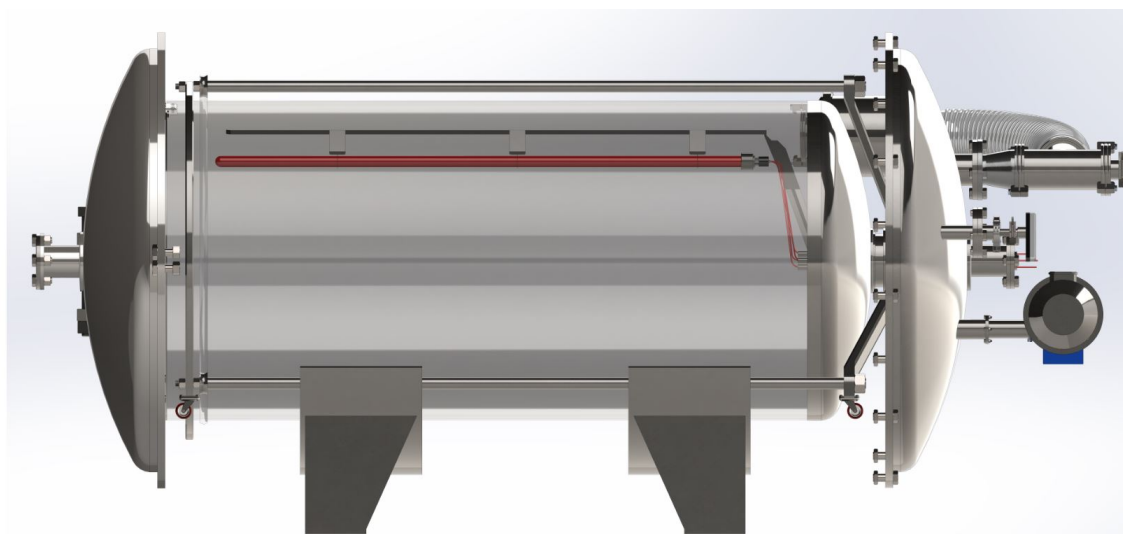


Figura 5.15: Montagem - 3.

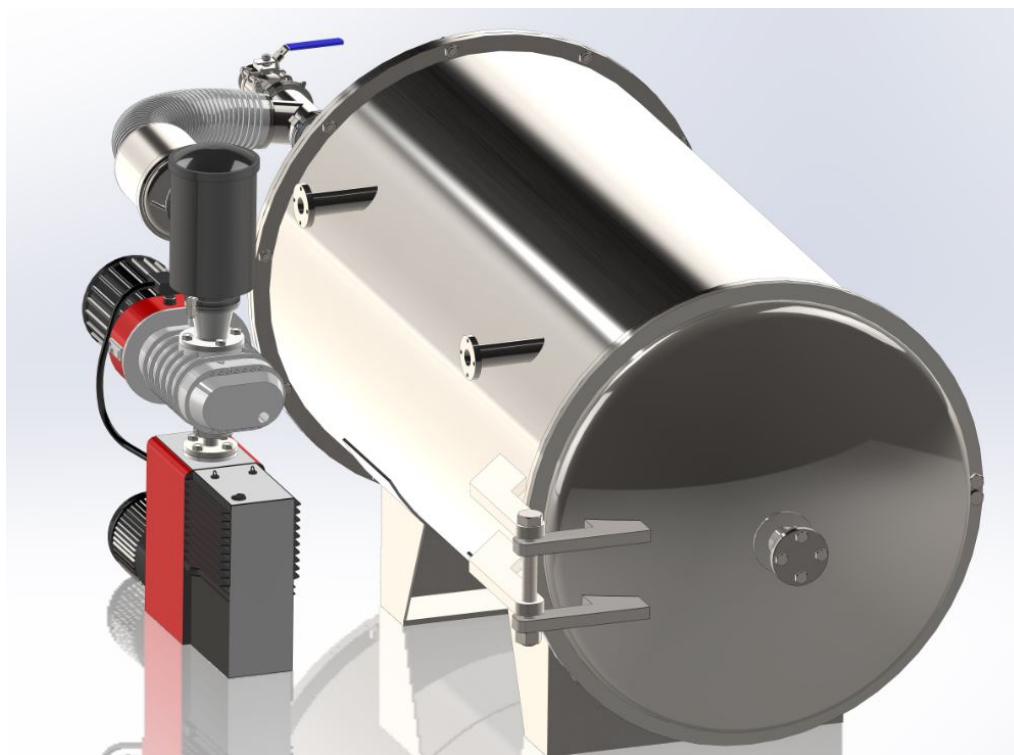


Figura 5.16: Montagem - 4.

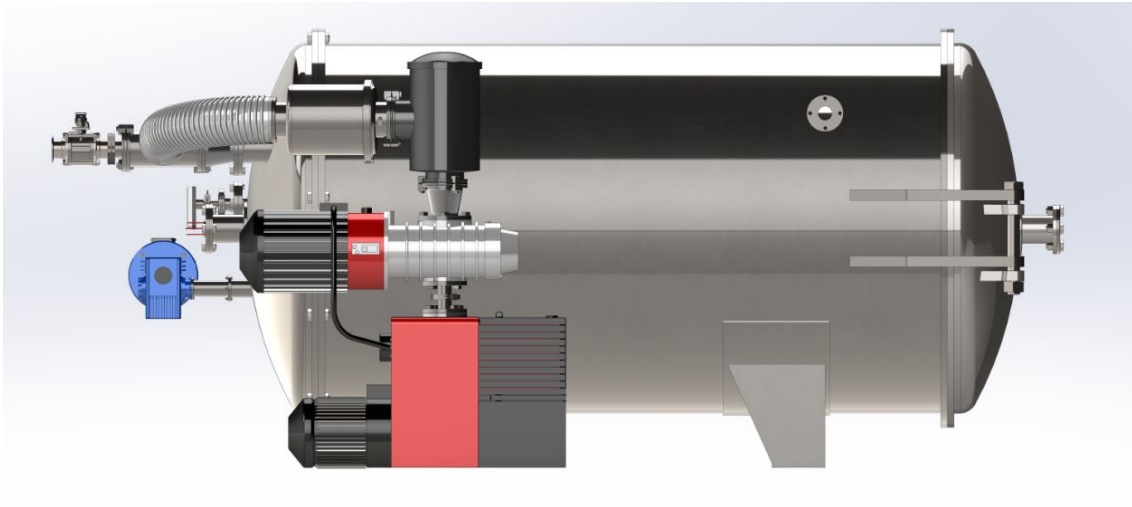


Figura 5.17: Montagem - 5.



## CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível abordar os conceitos básicos essenciais ao projeto de um equipamento industrial para remoção do composto 2,4,6 - tricloroanisol, o qual teve três vertentes fundamentais: vácuo, termodinâmica e mecânica de rotação.

Em relação ao vácuo pode-se afirmar que a sua presença não só promoveu um estudo de condutâncias que permitisse aferir à eficiência do sistema mediante escolha de bombas apropriadas, bem como ter uma percepção do tempo de bombeamento necessário para extrair todos os gases dentro da câmara. Verificou-se principalmente que o vapor de água das rolhas de cortiça condiciona consideravelmente o tempo necessário para se atingir a pressão de 0,1 mbar desejadas. Nesta vertente, foi possível também realizar a construção da câmara e constituintes principais com base em código ASME, o qual confere mais segurança, estabilidade e qualidade de construção. É no entanto importante referir que, apesar da construção da câmara com base neste código ter sido também validada em ambiente de simulação, equipamentos pressurizados são equipamentos sérios e que devem ser validados e auditados por entidades responsáveis. Um equipamento pressurizado mal dimensionado coloca em risco de vida os operadores do mesmo.

Relativamente ao sistema térmico, um estudo teórico e numérico com recurso à lei de Stefan-Boltzmann e capacidade térmica, bem como uma análise de transferência de calor entre superfícies permitiram averiguar, num contexto radiativo simplificado, qual o tempo necessário para aquecer o conjunto de rolhas mediante uma potência inicial determinada bem como ter uma percepção da eficiência de aquecimento por análise de perdas de calor. Quando comparado com a simulação em *SolidWorks*, o cálculo teórico apresentou diferenças nomeadamente nas temperaturas finais do tambor e câmara bem como na curva de evolução da temperatura ao longo do tempo, ainda que estas diferenças, numa ótica pessoal, se encontrem dentro de limites aceitáveis.

Por sua vez, em relação à mecânica de rotação foi possível - com as aproximações necessárias pois a especificação de um sistema de rotação meramente teórico é complicado, nomeadamente a nível de cálculo de binários e fenómenos de fricção - aferir os passos essenciais para o cálculo de uma desmultiplicação de velocidade através de engrenagens, calcular o torque de aceleração com base nos momentos de inércia dos constituintes do sistema bem como escolher um motor apropriado.

Fazendo uma retrospectiva do trabalho realizado bem como futuros desenvolvimentos, o controlador responsável pelo automatismo do processo pode ser abordado com mais detalhe especificando em concreto o seu funcionamento mediante a escolha apropriada de equipamentos para o seu efeito.

O sistema de vácuo por sua vez pode ser otimizado não só pela alteração das bombas indicadas por bombas com maiores velocidades de bombeamento (a bomba rotativa pode também ser alterada por uma bomba *scroll* eliminando-se a necessidade de uma trapa fria) bem como ser realizada uma otimização das flanges incluídas no sistema.

Por fim e relativamente ao sistema termodinâmico, um estudo que também calcule perdas de calor por condução e convecção será por consequência mais rigoroso podendo este ser avaliado mediante um modelo de transferências de calor mais complexo que contemple, em simultâneo, todos os equipamentos do sistema.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Gil. *Cortiça: Produção, Tecnologia e Aplicação*. Lisboa: Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, 1996. ISBN: 972-676-162-X.
- [2] Amorim. *Mitos e Curiosidades, A Cortiça - Corticeira Amorim, Líder Mundial Setor Cortiça*. URL: <https://www.amorim.com/a-cortica/mitos-e-curiosidades/Montado-e-Producao-Mundial/108/>.
- [3] APCOR. *O que é?* [Online]. URL: <http://www.apcor.pt/cortica/o-que-e/>.
- [4] Amorim. *A ARTE DA CORTIÇA*. [Online]. URL: [https://www.amorim.com/xms/files/Documentacao/Brochura\\_Arte\\_Cortica\\_PT\\_Small.pdf](https://www.amorim.com/xms/files/Documentacao/Brochura_Arte_Cortica_PT_Small.pdf).
- [5] M. F. P. de Fonseca. “2,4,6-Tricloroanisol: validação do método de análise e estudos de adsorção e dessorção em rolhas de cortiça”. Tese de mestrado. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Julho 2013.
- [6] S. Insa, V. Salvadó e E. Anticó. “Development of solid-phase extraction and solid-phase microextraction methods for the determination of chlorophenols in cork macerate and wine samples”. Em: *Journal of chromatography A* 1047.1 (2004), pp. 15–20.
- [7] M. K. Taylor, T. M. Young, C. E. Butzke e S. E. Ebeler. “Supercritical fluid extraction of 2, 4, 6-trichloroanisole from cork stoppers”. Em: *Journal of agricultural and food chemistry* 48.6 (2000), pp. 2208–2211.
- [8] C. Pereira e L. Gil. “O Problema do Odor a Mofo nas Rolhas de Cortiça e Processos para a sua Redução/Eliminação”. Em: *Silva Lusitana* 14.1 (2006), pp. 101–111.
- [9] *O combate ao 2,4,6-Tricloroanisole*. [Online]. URL: <https://www.apcor.pt/combate-ao-tca-tricloroanisole/>.
- [10] *Prevenção e tratamento ao mais alto nível*. [Online]. URL: <http://www.amorimcork.com/pt/natural-cork/raw-material-and-production-process/>.
- [11] F. P. M. P. de Figueiredo. “2, 4, 6-tricloroanisol em rolhas de cortiça natural: eficácia do equipamento de deteção individual na prevenção da contaminação de vinhos”. Em: (2014).
- [12] F. José Manuel Leal. *Method of solid-liquid extraction applied to cork products*. EP1108507B1. 1999. URL: <https://patents.google.com/patent/EP1108507B1/en>.

- [13] M. Cabral. *Cork product treatment system and apparatuses by extraction of compounds dragged in water vapour*. WO Patent App. PCT/PT2003/000,010. 2004. URL: <https://www.google.com/patents/WO2004014436A1?cl=en>.
- [14] B. C. d. Vasconcelos. “Migração de 2,4,6-TCA através de rolhas neutrocork para um vinho e implementação do método de análise para MDMP”. Tese de mestrado. Porto: Universidade Católica Portuguesa, Escola Superior de Biotecnologia, Setembro de 2012.
- [15] M. Cabral. *Cork product treatment process by extraction of compounds dragged in water vapour*. EP Patent 1,551,463. 2006. URL: <https://www.google.com/patents/EP1551463B1?cl=en>.
- [16] *Uma nova tecnologia desenvolvida para a redução de voláteis em rolhas de cortiça natural: o processo INNOCORK*. [Online]. URL: [http://www.apcor.pt/wp-content/uploads/2015/09/INNOCORK\\_P\\_Oct\\_07.pdf](http://www.apcor.pt/wp-content/uploads/2015/09/INNOCORK_P_Oct_07.pdf).
- [17] I. Konishi, R. Tajima e T Tsutsumi. *Method for deodorization of cork*. US5174956A. 1992. URL: <https://patents.google.com/patent/US5174956A/en?q=cork+supply&q=tca#citedBy>.
- [18] C Pereira, L Gil e L Carriço. “Reduction of the 2, 4, 6-trichloroanisole content in cork stoppers using gamma radiation”. Em: *Radiation Physics and Chemistry* 76.4 (2007), pp. 729–732.
- [19] C. Oliveira. *Processo Symbios*. Powepoint [Online]. Instituto Superior Técnico, 2016, 22 março. URL: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571249856/Symbios-\\_Seminario\\_IST.ppt](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571249856/Symbios-_Seminario_IST.ppt).
- [20] A. Cork. *NDTECHE NDTECHEFERVESCENTE*. 2020. URL: <https://www.amorimcork.com/pt/a-cortica-e-o-vinho/ndtech-e-ndtech-efervescente/>.
- [21] APCOR. *ROLHAS NATURAIS*. 2019. URL: <http://www.apcor.pt/produtos/rolhas/rolhas-naturais/>.
- [22] A. P. D. e João Carlos Bordado. *Cork – a renewable raw material: forecast of industrial potential and development priorities*. 2015. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2015.00002/full>.
- [23] E. F. Megyesy. *Pressure Vessel Handbook 12th ed*. P.O.Box 35365 Tulsa, Oklahoma 74153: Pressure Vessel Publishing; 12th edition (October 1, 2001), 2001. ISBN: 0-914458-21-3.
- [24] A. STEELS. *Stainless Steel Grade Datasheets*. 2011. URL: <http://www.atlassteels.com.au/site/pages/stainless-steel-datasheets.php>.
- [25] V. P. Institute e S. University. *Structure And Form Analysis System (SAFAS)*. 2011. URL: [https://www.setareh.arch.vt.edu/safas/007\\_fdmtl\\_30\\_allowable\\_stress.html](https://www.setareh.arch.vt.edu/safas/007_fdmtl_30_allowable_stress.html).

- 
- [26] V. P. Institute e S. University. *Structure And Form Analysis System (SAFAS)*. 2010. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/3ad8/36504c566eb76c7817e6647aaae8acb8009c.pdf>.
- [27] Y. A. Cengel. *HEAT TRANSFER, A Practical Approach*. McGraw-Hill (Tx); 2nd Edition (November 1, 2002), 2002. ISBN: 9780072458930.
- [28] A. M.C. Moutinho, M. Eugénia S. Fronteira e Silva e M. Áurea C.M. Isidoro da cunha. *Tecnologia de Vácuo*. Av. Miguel Bombarda, 20-1. 1000 Lisboa, Portugal: Faculdade de Ciências e Tecnologia, 1980.
- [29] D. Industry. *Vacuômetro com sensor combinado (Piezo/Pirani) TPG 202*. 2020. URL: <https://www.directindustry.com/pt/prod/pfeiffer-vacuum/product-14656-1643855.html>.
- [30] E. V. E. Limited. *Manual de Instruções - Armadilhas de entrada IT20K, IT100, IT300 e IT800*. 2008. URL: <https://shop.edwardsvacuum.com/products/a44215000/view.aspx>.
- [31] L. Ideal Vacuum Products. *NEW Edwards ITF20K Vacuum Pump Inlet Dust Filter, KF25, Edwards Part Number A442-15-000*. 2008. URL: <https://www.idealvac.com/product.asp?pid=2661>.
- [32] N.-C. Products. *Nor-Cal Products where technology takes shape*. URL: <https://www.idealvac.com/files/cataloghelpfiles/Nor-Cal-Products-Foreline-Traps.pdf>.
- [33] L. Ideal Vacuum Products. *Edwards Vacuum*. 2015. URL: [https://www.edwardsvacuum.com/CatalogFlipbook/files/assets2/common/downloads/Edwards\\_Product\\_Catalogue.pdf](https://www.edwardsvacuum.com/CatalogFlipbook/files/assets2/common/downloads/Edwards_Product_Catalogue.pdf).
- [34] D. Industry. *Que motor elétrico escolher?* 2020. URL: <http://guide.directindustry.com/pt/que-motor-eletrico-escolher/>.
- [35] Wikipedia. *Motor elétrico*. 2020. URL: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Motor\\_elétrico](https://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_elétrico).
- [36] L. Technology. *Motor Torque Calculations*. 1997. URL: <http://www.leadshine.com/>.
- [37] P. J. L. Erthal. *Mecanismos Engrenagens Interferência*. URL: <https://slideplayer.com.br/slide/361430/>.
- [38] A. M. S. Anbazhagan e M. D. Anand. *Design and Crack Analysis of Pressure Vessel Saddles Using Finite Element Method*. Department of Mechanical Engineering, Noorul Islam Centre for Higher Education, India, 2016.
- [39] E. E. the World of Piping. *Introduction to Spherical and Cylindrical Pressure Vessels*. 2018. URL: <http://www.wermac.org/equipment/pressurevessel.html>.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [40] L. Ideal Vacuum Products. *Ideal Vacuum Products, LLC*. 2003-2020. URL: <https://www.idealvac.com/>.
- [41] Groschopp. *AC RIGHT ANGLE GEARMOTORS*. URL: <https://www.groschopp.com/motors/ac-gear-motor/ac-right-angle-gearmotors/>.
- [42] Groschopp. *MOTOR TECH DATASHEET*. URL: <https://www.groschopp.com/data/other/Performance/76269.pdf>.

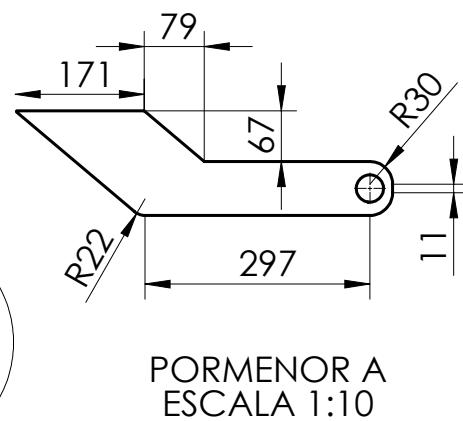
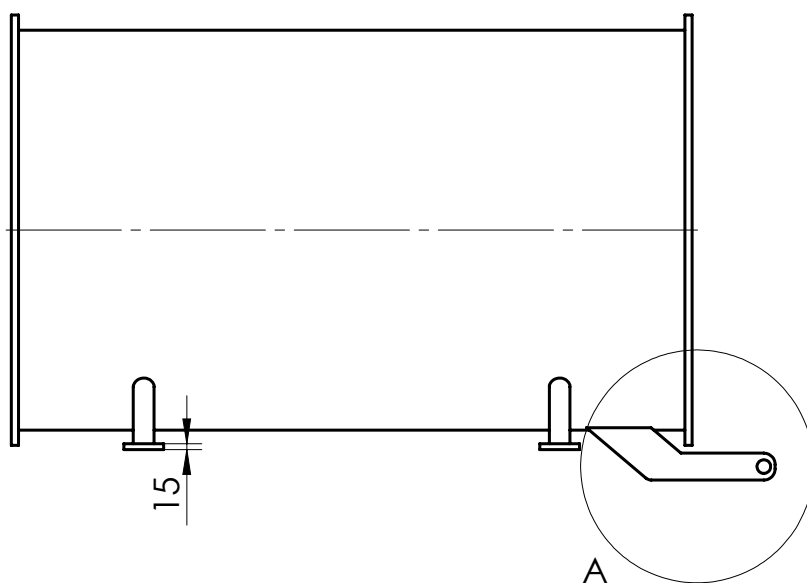
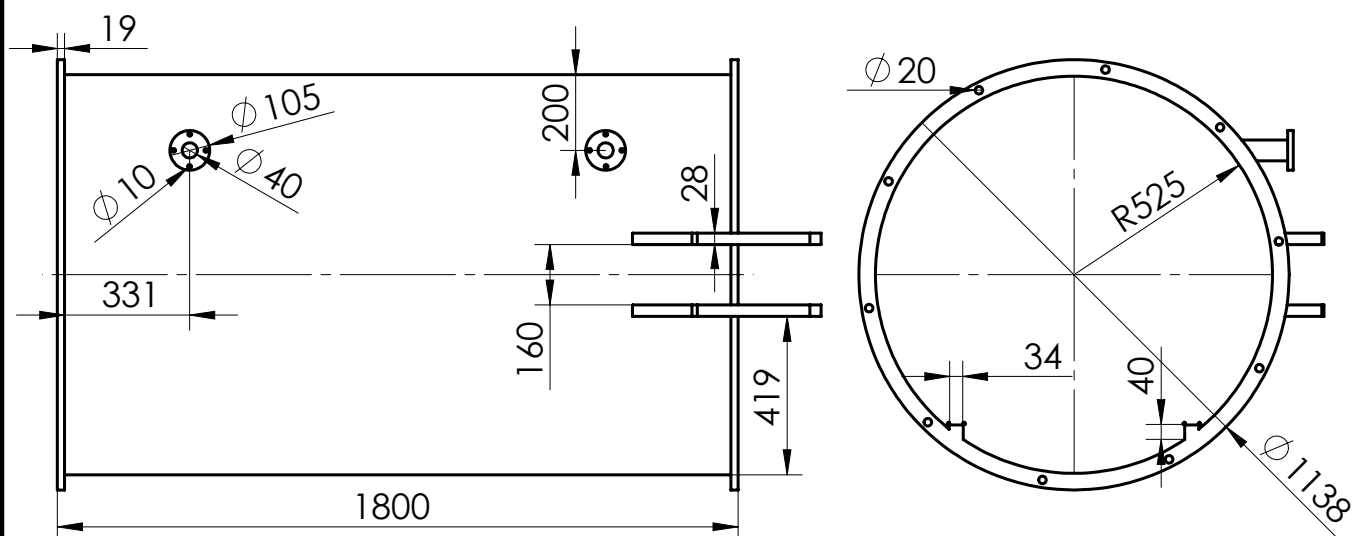
A P Ê N D I C E



## **D E S E N H O S   T É C N I C O S**

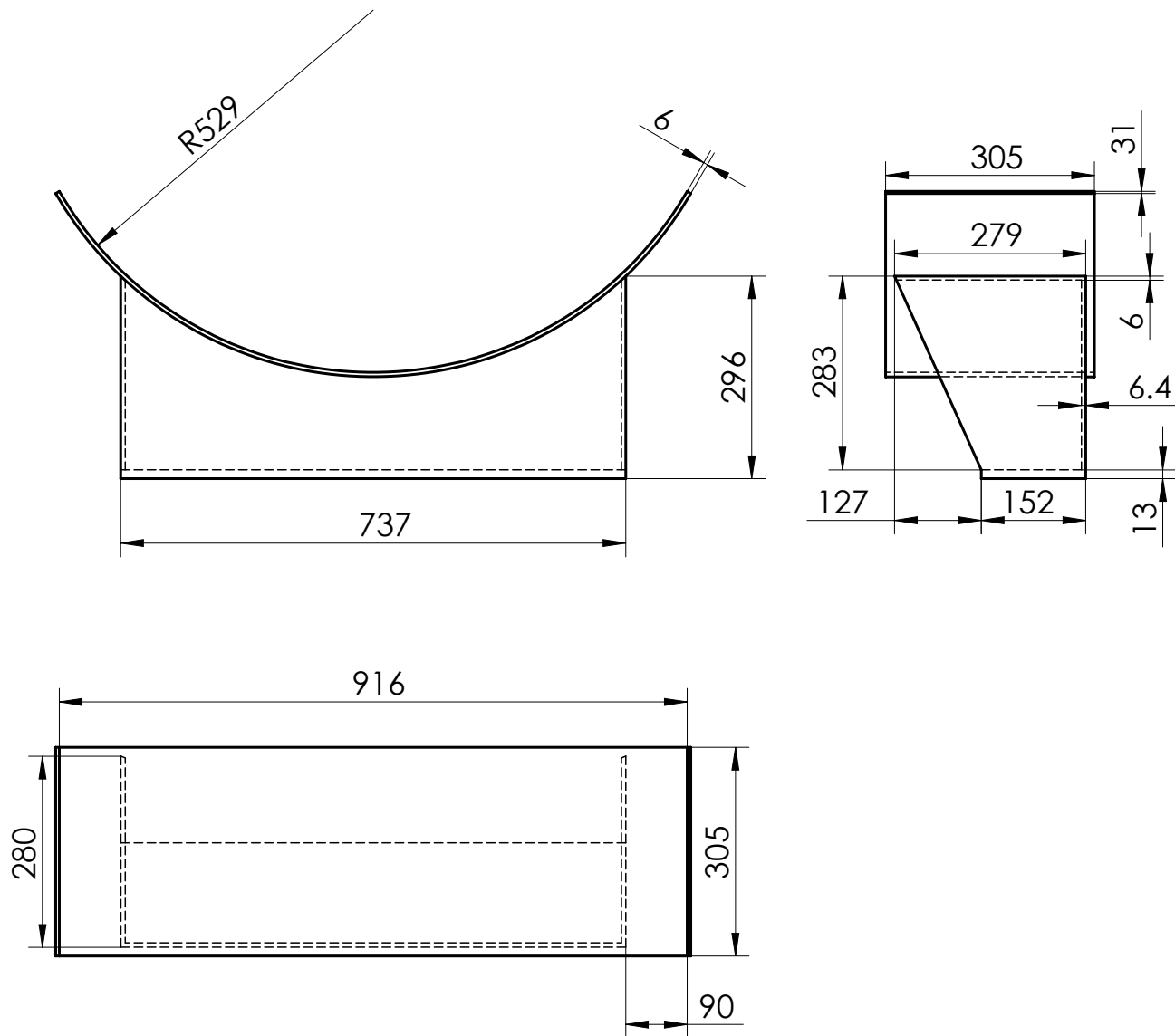
De seguida apresentam-se os desenhos técnicos dos componentes principais não normalizados do projeto.

Proj.	11/01/2020		F.C.T U.N.L	Miguel R. Rossa
Des.	17/05/2020			



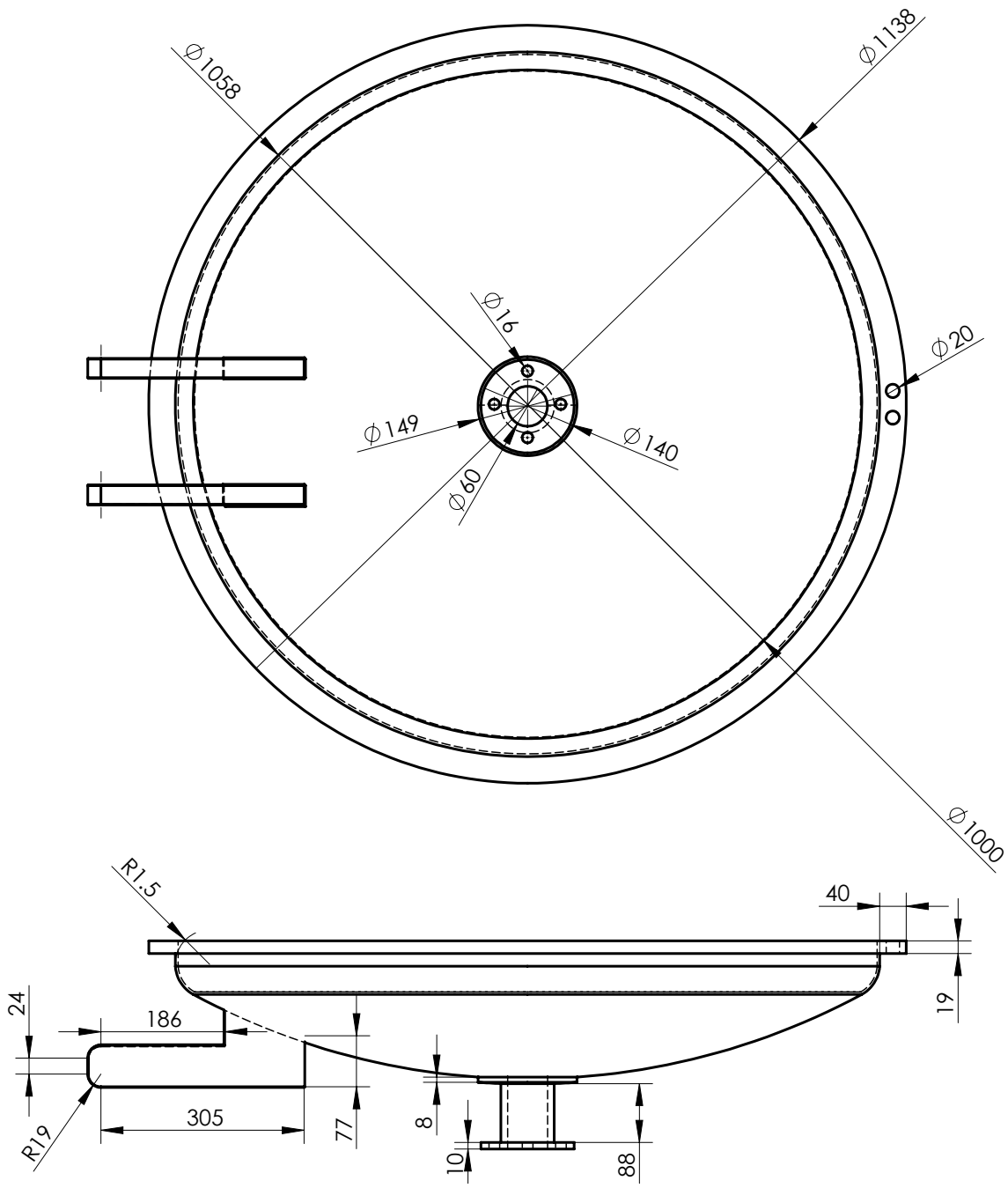
Observações:	1:20	Câmara Externa	Nº 1

Proj.	11/01/2020		F.C.T U.N.L	Miguel R. Rossa
Des.	18/05/2020			



Observações:	1:10	<i>Suportes Câmara</i>	Nº 2
	2 peças		

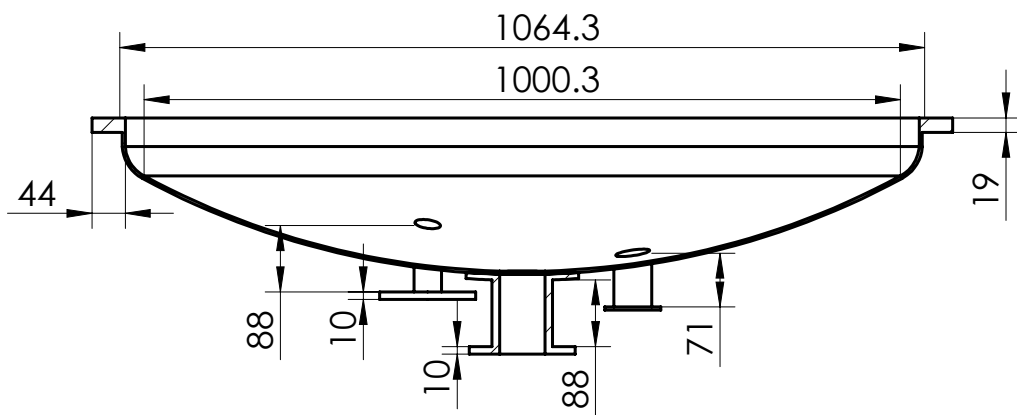
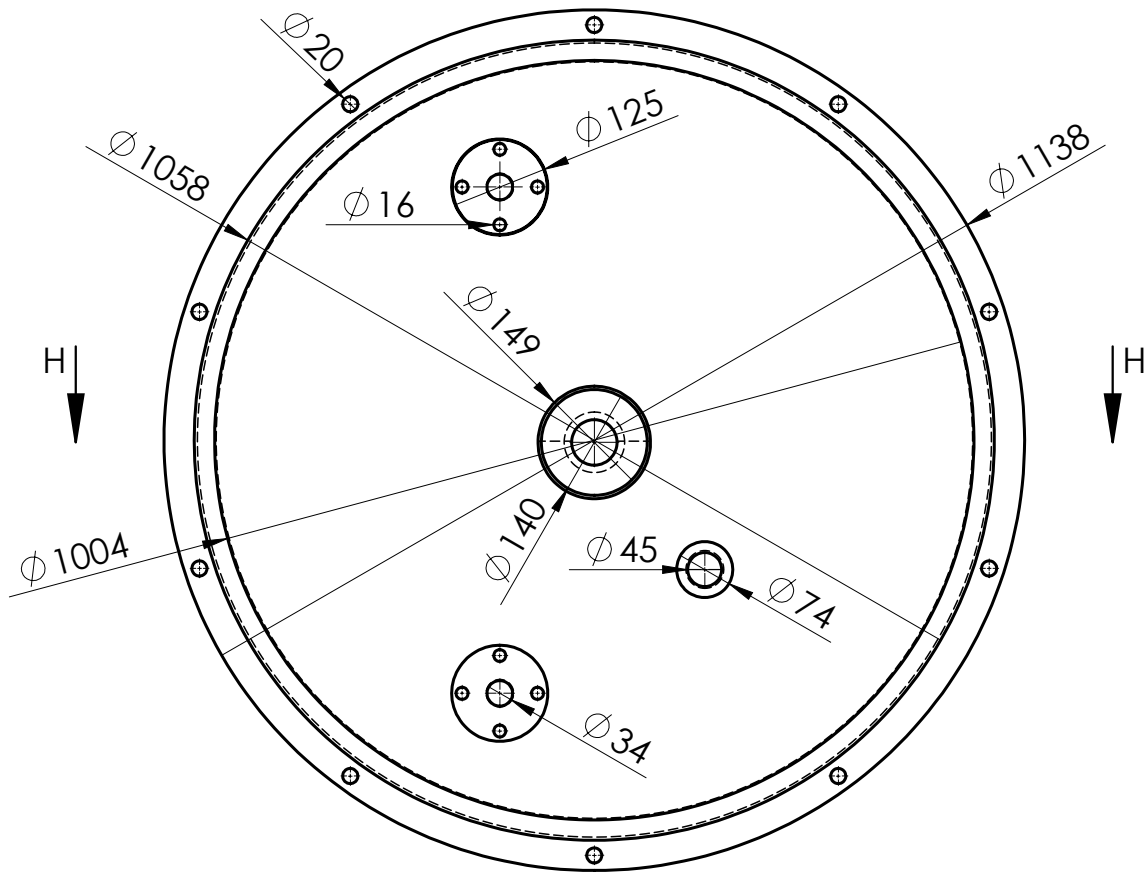
Proj.	11/01/2020		F.C.T U.N.L	Miguel R. Rossa
Des.	19/05/2020			



Observações:	1:10	Porta Câmara	Nº 3

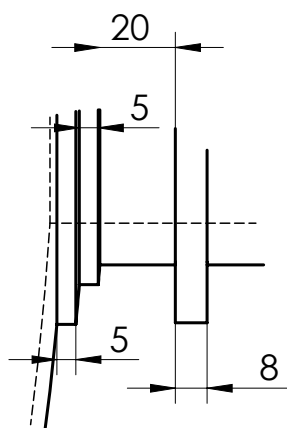
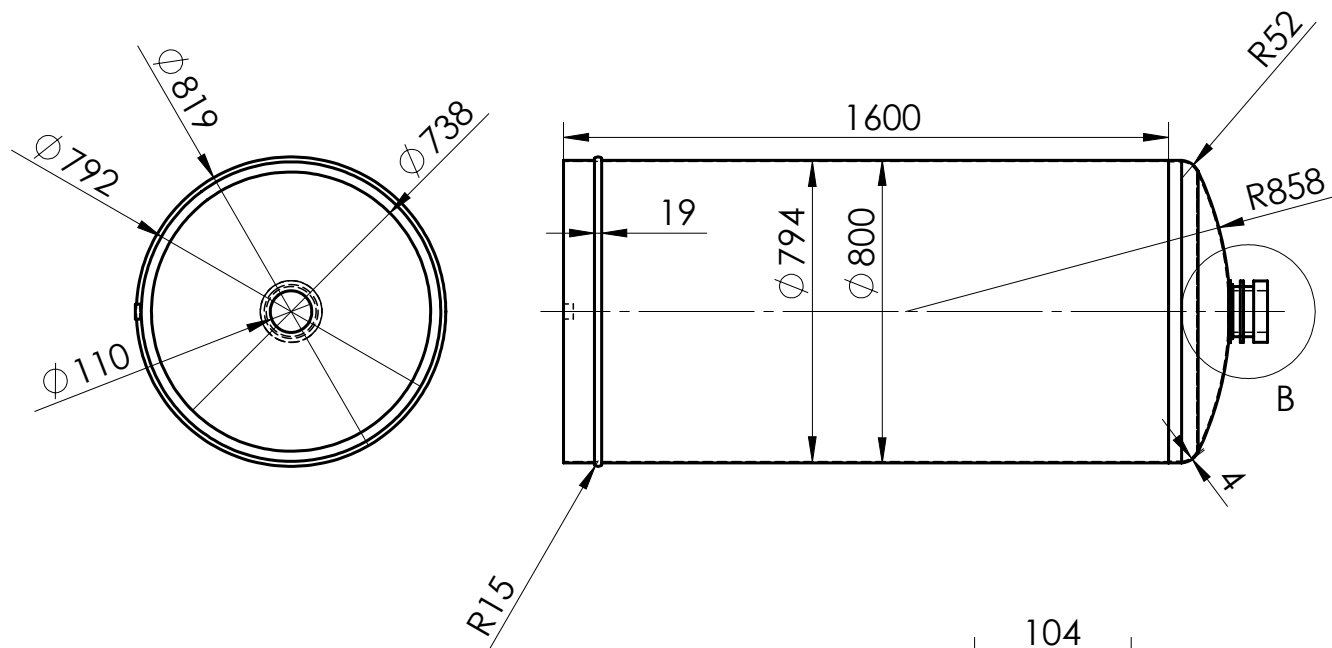


Proj.	11/01/2020		F.C.T U.N.L	Miguel R. Rossa
Des.	01/06/2020			

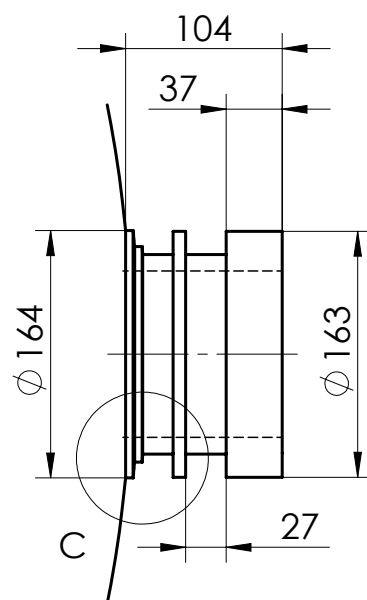


Observações:	1:10	<i>Cabeça torisférica</i>	Nº 4

Proj.	11/01/2020		F.C.T U.N.L	Miguel R. Rossa
Des.	01/06/2020			



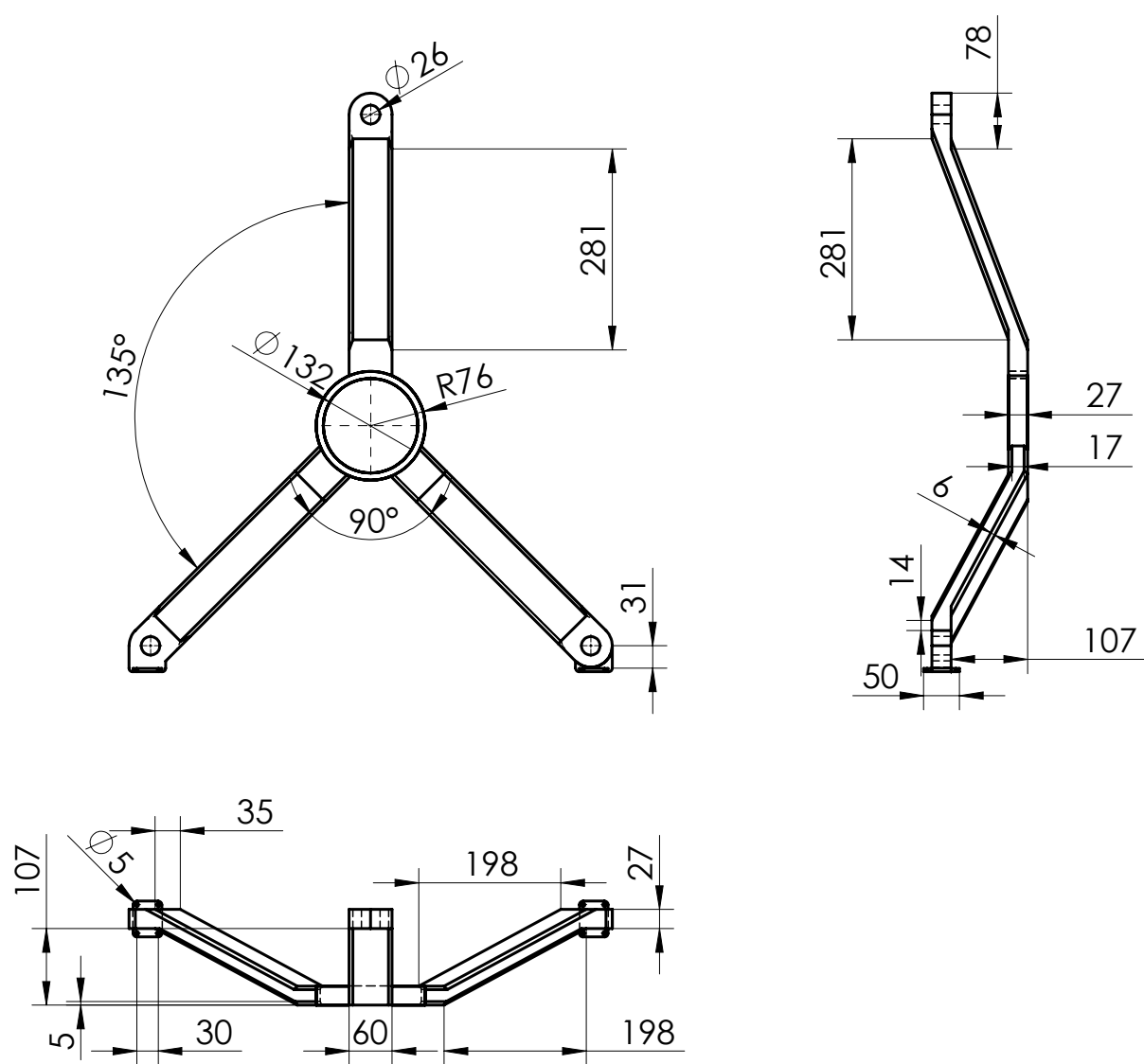
PORMENOR C  
ESCALA 1 : 2



PORMENOR B  
ESCALA 1 : 5

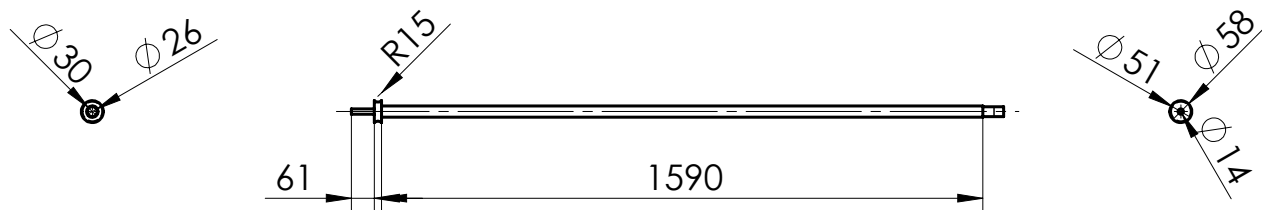
Observações:	1:20	<i>Tambor rotativo</i>	Nº 5

Proj.	11/01/2020		F.C.T U.N.L	Miguel R. Rossa
Des.	01/06/2020			



Observações:	1:10	Suporte frontal tambor	Nº 6

Proj.	11/01/2020		F.C.T U.N.L	Miguel R. Rossa
Des.	06/03/2020			



Observações:	1:20	Veio Suporte	Nº 7					
	3 peças							



